

SIMULOINNIN JA MALLINNUKSEN SOVELTAMINEN ULTRAÄÄNITARKASTUKSESSA

Matti Sarkimo, Jorma Pitkänen

(VTT Tuotteet ja Tuotanto)

Tutkimuksen yhteyshenkilö Säteilyturvakeskuksessa **Olavi Valkeajärvi**

STUKin raporttisarjoissa esitetyt johtopäätökset ovat tekijöiden johtopäätöksiä, eivätkä ne välttämättä edusta Säteilyturvakeskuksen virallista kantaa.

ISBN 951-712-647-6 (nid.)

ISBN 951-712-648-4 (pdf)

ISSN 0785-9325

Dark Oy, Vantaa 2003

SARKIMO Matti, PITKÄNEN Jorma (VTT Tuotteet ja Tuotanto). Simuloinnin ja mallinnuksen soveltaminen ultraäänitarkastuksessa. STUK-YTO-TR 195. Helsinki 2003. 50 s.

Avainsanat: ultraäänitarkastus, simulointi, mallinnus

Tiivistelmä

Tässä raportissa on tarkasteltu kahta erityyppistä ohjelmistoa, jotka on suunniteltu ultraäänitarkastuksen simulointiin. Kummankin ohjelmiston tärkeimmät ominaisuudet ja toimintaperiaatteet on esitelty. Simulointiesimerkkien avulla on havainnollistettu ohjelmistojen sovellusmahdollisuuksia ja niillä saatavia tuloksia.

Midas Ray Tracing -ohjelmisto perustuu sädemenetelmään ja se soveltuu hyvin kolmiulotteisten geometrinen mallien avulla tapahtuvaan luotauksen perusasioiden tarkasteluun. Geometrialtaan vaikeasti hahmotettavien kohteiden tarkastelu on havainnollista, mutta simulointi perustuu vain kaavamaiseen ultraäänen heijastumista ja taittumista koskevien perussääntöjen soveltamiseen.

Impulse -ohjelmistolla voidaan tutkia monipuolisemmin ultraäänen fysikaaliseen käyttäytymiseen liittyviä seikkoja. Ultraäänipulssin painejakaumaa ja pulssin etenemistä materiaalin sisällä kyetään mallintamaan. Edelleen voidaan tarkastella pulssin käyttäytymistä erilaisten geometrinen muotojen kohdalla ja havainnoida heijastajien aiheuttamien kaikujen syntymistä ja palaamista anturille. Impulse -ohjelmiston nykyinen versio toimii kuitenkin vain kaksiulotteisessa avaruudessa ja Dos-käyttöjärjestelmä asettaa rajoituksia simuloitavan alueen koolle.

Raportin loppuosaan on koottu katsaus koskien ultraäänitarkastuksen simulointi- ja mallinnusohjelmistojen nykytilannetta. Se perustuu pääosin kirjallisuuslähteisiin ja sisältää tärkeimmät eurooppalaiset kehityshankkeet.

SARKIMO Matti, PITKÄNEN Jorma (VTT Industrial Systems). Application of simulation and modelling to ultrasonic inspection. STUK-YTO-TR 195. Helsinki 2003. 50 pp.

Keywords: ultrasonic inspection, simulation, modelling

Abstract

This report includes a review of two different programs that are developed for simulation of ultrasonic inspection. Their main features and functions are described. The most important simulation options and results are demonstrated by examples.

Midas Ray Tracing program can be used to examine the basic requirements of inspections and it is well applicable to three dimensional geometric models. Simulations of inspection tasks with complicated geometry can be conveniently examined but the program includes only rigid application of basic reflection and refraction rules of ultrasound.

The features of Impulse program allow wider examination of ultrasonic physical behaviour. The pressure distribution of ultrasonic pulse and its propagation can be modelled. Also interaction of the pulse with different geometric details can be studied and origin and movement of echoes observed. The current version of Impulse program is only two dimensional and Dos-operating system sets strict limitations on the size of the simulation area.

The last part of the report is a review about the status of ultrasonic simulation and modelling programs. It is based mainly on literature sources and covers the most important European development projects.

Alkusanat

Tässä raportissa esitetty tutkimustyö on toteutettu osana FINNUS -tutkimusohjelmaan kuuluvaa projektia ”Tarkastukset ja kunnonvalvonta” (INSMO). Tutkimuksen rahoittajina ovat olleet Säteilyturvakeskus, Kauppa- ja teollisuusministeriö ja VTT Tuotteet ja tuotanto.

Projektin kuluessa tuloksia on julkaistu useammassa erillisessä raportissa, joista keskeinen sisältö on koottu tähän raporttiin ja täydennetty projektin viimeisen vuoden tuloksilla.

Työn valvojana Säteilyturvakeskuksesta on toiminut ylitarkastaja Olavi Valkeajärvi.

Espoo, 11.12.2002

Tekijät

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	7
2 SÄDEMENETELMÄÄN PERUSTUVA ULTRAÄÄNITARKASTUKSEN SIMULOINTI	8
2.1 Sädemenetelmään perustuvan simulointiohjelman toiminta	8
2.1.1 Yleiset ominaisuudet	8
2.1.2 Luotaimen määrittely	8
2.1.3 Tarkastuskohteen mallinnus	9
2.1.4 Luotaus	9
2.1.5 Luotautulosten esittäminen	10
2.1.6 Muut ominaisuudet	12
2.2 Vaativan geometrian tarkastelu sädemenetelmän avulla	14
2.2.1 Simuloinnin tarkastustilanne	14
2.2.2 Vikaheijastajat	15
2.2.3 Geometrian mallinnus	15
2.2.4 Virtuaalinen skanneri ja luotaimen asemointi	15
2.2.5 Simulointimenetelmä	16
2.2.6 Luotauskulmien optimointi	16
2.2.7 Käsiluotaus	19
2.2.8 Mekanisoitu tarkastus	19
2.3 Yhteenveto ja päätelmät	22
3 ESIMERKKI ULTRAÄÄNITARKASTUKSEN FYSIKAALISEN KÄYTTÄYTYMISEN SIMULOINNISTA	23
3.1 Ohjelmiston toiminta	23
3.1.1 Ohjelmiston yleiset ominaisuudet	23
3.1.2 Luotauskohteen mallinnus	23
3.1.3 Luotaimen määrittely	24
3.1.4 Laskenta	25
3.1.5 Tulosten havainnollistaminen ja analysointi	25
3.2 Simulointiesimerkit	25
3.2.1 Sivuttaisporauksesta saatavan vasteen simulointi	25
3.2.2 Kulmaheijastajasta saatavan vasteen simulointi	26
3.3 Yhteenveto ja päätelmät	32
4 KATSAUS SIMULOINTI- JA MALLINNUSOHJELMIEN NYKYTILANTEeseen	33
4.1 Eri mallintajien status	33
4.1.1 Commissariat à l'énergie Atomique (CEA)	33
4.1.2 Kasselin yliopisto, Saksa	35
4.1.3 Chalmersin teknillinen korkeakoulu, Ruotsi	37
4.1.4 BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung), Saksa	39
4.1.5 IZFP (Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren), Saksa	41
4.1.6 AEA Technology / Serco Assurance, Englanti	43
4.1.7 Tecnatom SA, Espanja	44
4.1.8 Wave Process Simulation Systems Laboratory, Venäjä	45
4.2 Yhteenveto ohjelmistojen nykytilanteesta	46
5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	48
LÄHDEVIITTEET	49

1 Johdanto

Erilaisten koetarkastusten tekeminen on tavallista sekä ultraäänitarkastusten suunnitteluvaiheessa että niiden suorituskykyä arvioitaessa. Näitä kokeiluja varten tarvitaan koekappaleita, joihin on sijoitettu vikoja tai testiheijastajia keskeisiin kohtiin tarkastettavaa aluetta. Monissa tapauksissa koekappaleiden valmistaminen on kallista ja vaatii runsaasti aikaa. Varsinkin vaativien rakenteiden toteuttaminen käyttäen oikeita materiaaleja edellyttää usein perusteellisia valmisteluja ja aiheuttaa huomattavia kustannuksia. Testivikojen ja -heijastajien sijoittelua koekappaleisiin rajoittaa käytännössä valmistustekniset tekijät ja käytettävissä oleva tila ja tämän vuoksi niiden variointi on useinkin melko vähäistä. Monissa tapauksissa simuloinnin ja mallinnuksen hyväksikäyttö tarjoaa mahdollisuuksia tutkia nopeasti ja edullisesti ultraäänitarkastuksen toimintaedellytyksiä ja tuottaa aineistoa sen suorituskyvyn osoittamiseksi. Kun tarkastuskohteen malli on luotu on vikojen variointi siinä samoin kuin tarkastusparametrien muuntelu helpoa ja nopeaa.

Simulointi- ja mallinnusohjelmistojen suunnittelussa ja toteutuksessa on käytetty useita lähestymistapoja. Suhteellisen yksinkertaisilla ohjelmistoilla voidaan tarkastella luotausgeometrian toimintaa. Nämä ohjelmistot ovat toiminnaltaan nopeita ja niiden avulla luotaustilanteita voidaan tarkastella interaktiivisesti käyttäen kolmiulotteisia geometrisia malleja. Ultraäänen fysikaali-

set ominaisuudet ovat näissä ohjelmistoissa toisaalta puutteellisesti huomioitu eikä esimerkiksi aaltomuodon muutoksia tai diffraktiokaikujen muodostumista ole huomioitu lainkaan. Ohjelmistot sopivat kuitenkin monien tarkastukseen liittyvien perusasioiden selvittämiseen. Fysikaalisten ominaisuuksien huomioiminen edellyttää ohjelmistolta paljon matemaattista laskentaa, mikä saattaa johtaa merkittäviin viiveisiin. Samoin simuloinnin tehtäväkuvaus on näiden ohjelmistojen osalta vaativampaa koska tarkastuskohteen ja luotaimen ominaisuudet on määritettävä useinkin hyvin yksityiskohtaisesti simulointia valmisteltaessa. Toisaalta on mahdollista saada tulokset hyvinkin todenmukaisia tulostuksia.

Tässä raportissa on käyty läpi kahden erityyppisen simulointiohjelmiston ominaisuuksia. Lisäksi on kummallakin ohjelmistolla tehty simulointeja, joiden toteutuksesta ja tuloksista on otettu mukaan esimerkkejä. Toinen ohjelmistoista perustuu sädemenetelmään ja edustaa tarkastuksen geometrian käsittelyyn suuntautunutta ohjelmistotyyppiä. Toinen esimerkkiohjelmisto sisältää puolestaan numeeriseen laskentaan perustuvan käsittelyrutiinin, jolloin eräitä ultraäänen fysikaaliseen käyttäytymiseen liittyviä piirteitä voidaan saada esille. Raportin viimeisessä osassa on kirjallisuuslähteisiin perustuva katsaus mallinnus- ja simulointiohjelmistojen nykytilanteeseen.

2 Sädemenetelmään perustuva ultraäänitarkastuksen simulointi

Tässä luvussa kuvataan ja esitetään tuloksia koskien Midas Simulation Ray-Tracing-ohjelmistoa, jonka valmistaja on Tecnatom S.A. (Espanja). Simulointien tuloksia on esitelty laajemmin julkaisussa Sarkimo & Pitkänen (2000) ja Sarkimo (2001).

2.1 Sädemenetelmään perustuvan simulointiohjelman toiminta

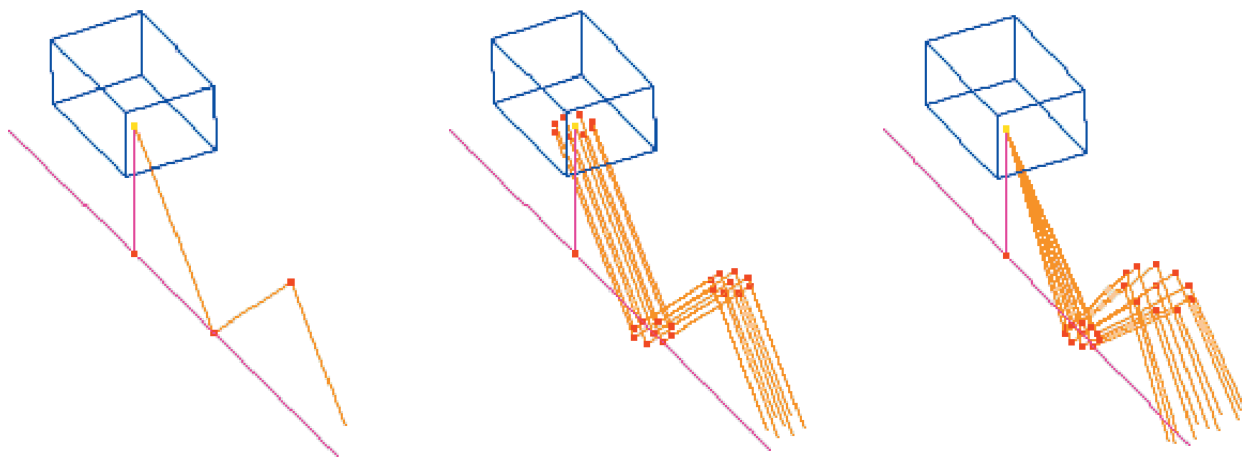
2.1.1 Yleiset ominaisuudet

Ohjelma on toteutettu eräänlaisella ”säteenheitto”-menetelmällä (ray-tracing), jossa ultraäänen eteneminen on mallinnettu suoraviivaisesti etenevien säteiden avulla. Anturista lähtevä äänikeila kuvataan joko yksittäisellä sädeviivalla tai sädeviivojen kimpulla. Kohdatessaan kappaleen rajapinnan tai materiaalin sisään sijoitetun geometrisen muodon äänen heijastuminen kuvataan tapahtuvaksi täysin peilimäisesti. Äänen taittuminen kahden materiaalin rajapinnassa voidaan myös simuloida, kun äänennopeudet eri aineissa annetaan ohjelmalle. Muut ultraäänen etenemiseen liittyvät fysikaaliset tekijät on jätetty huomioimatta. Koska ultraääni etenee materiaalisissa todellisuudessa aaltoliikkeenä, yksinkertaistus on hyvin voimakas. Esimerkiksi luotaimen todellista äänikeilan muotoa ja äänenpaineen jakautumista sen eri kohdissa ei voida huomioida. Samoin aaltomuodon muutokset ja diffraktiokaiut jäävät kokonaan käsittelemättä.

Voimakas yksinkertaistaminen ja suoraviivainen lähestymistapa rajoittavat huomattavasti ohjelman mahdollisuuksia tuottaa tuloksia, jotka sisältävät kaikki todellisessa luotauksessa syntyvät kaiut ja niistä muodostuvat näyttämät. Sen sijaan ohjelma tarjoaa useita mahdollisuuksia ja työkaluja ultraäänitarkastusten suunnitteluun ja luotausten kattavuuden tarkistamiseen. Yksinkertainen lähestymistapa tekee ohjelmasta myös kevyen ja nopean, jolloin sitä voidaan käyttää kohtuullisen kätevästi normaalissa toimistokäyttöön tarkoitettussa tietokoneessa. Merkittävää on myös se, että simulointi toteutetaan koko ajan kolmiulotteisena. Tarkastustilannetta tarkastellaan vuorovaikutteisesti sekä realistisesti ja kyettään havainnollistamaan eri vaiheisiin liittyvät seikat.

2.1.2 Luotaimen määrittely

Ultraäänianturi kuvataan simulointiohjelmassa suorakulmaisena särmiönä, jonka mitat voidaan määritellä halutun suuruiseksi. Simuloinnissa ultraääni lähtee aina luotaimen pohjan keskipisteestä, kuva 1. Anturin koko pohjapinta on aktiivista



Kuva 1. Vaihtoehdot äänikeilan kuvaamiseksi simulointiohjelmassa. Vasemmalla yksittäinen säde, keskellä sylinterimäinen äänikeila ja oikealla kartiomainen äänikeila.

aluetta, johon heijastuksen kautta palaava ultraäänisignaali ”havaitaan” ja rekisteröidään. Sen vuoksi anturin pohjan koon määrittelyllä voidaan säädellä, miten kauaksi lähtöpisteestään palanneet kaikusignaalit rekisteröidään. Toisin sanoen anturin kykyä havaita heijastuksia, jotka eivät palaa täsmällisesti lähetyssuuntaansa, voidaan parantaa suurentamalla sen pohjan pinta-alaa.

Suuntakulman avulla voidaan valita kulma, jossa äänisuihku suuntautuu materiaalin sisään. Käytettävissä on alue välillä $0^\circ \dots 90^\circ$, jolloin voidaan simuloida erilaisia kulma- ja normaali-luotaimia. Sivukulmaa säätämällä anturia voidaan kääntää luotauspinnalla mielivaltaisesti ($0^\circ \dots 360^\circ$) ja sen avulla valitaan haluttu luotaus-suunta.

Äänikeilaa voidaan simuloinnissa kuvata kolmella eri tavalla. Yksinkertaisin malli on yksittäinen säde (single beam), jolloin esitetään ainoastaan kuvitellun äänisuihkon keskiviiva. Yksittäinen säde tarjoaa mahdollisuuden tutkia havainnollisesti äänikeilan ideaalista etenemistä sen teoreettisessa kulkusuunnassa. Äänisuihkon fyysistä kokoa voidaan kasvattaa määrittämällä se sylinteriksi, jolloin se kuvataan tasapaksuna, putkimaisena suihkuna. Tämän sylinterin halkaisijaa voidaan säätää. Kolmas vaihtoehto on antaa äänisuihkulle kartiomainen muoto. Ääni lähtee silloin pistemäisesti luotaimen keskeltä ja leviää sen jälkeen jatkuvasti annetun aukeamiskulman mukaisesti. Kuvassa 1 on esimerkit erilaisista äänikeilan kuvaustavoista.

Kartiomaisella äänikeilalla näyttäisi olevan parhaat mahdollisuudet jäljitellä todellisuudessa esiintyviä äänisuihkon muotoja, vaikka simulointi jää tässäkin tapauksessa hyvin likimääräiseksi. Keilan eri osien välillä ei ole vaihtelua äänenpaineessa, vaan kimpun reunoilla ja keskellä olevat ”äänisäteet” tuottavat kaikukorkeudeltaan samantasoisen vasteen, mikä ei luonnollisestikaan vastaa todellista luotusta.

Matka, jonka ääni etenee anturista voidaan simuloinnissa säätää halutun mittaiseksi. Säädetty ”äänitien pituus” vaikuttaa samalla myös Akuvan aika-asteikon pituuteen. Simuloinnissa on mahdollista tutkia erittäin pitkiäkin ääniteitä, jotka saattavat olla käytännön kannalta hyvin teoreettisia. Äänitietä pitkin tapahtuva lineaarinen vaimennus voidaan asettaa halutun suuruiseksi.

2.1.3 Tarkastuskohteen mallinnus

Itse simulointiohjelmalla voidaan mallintaa vain hyvin yksinkertaisten kappaleiden muotoja. Mahdolliset geometriat rajoittuvat sen puitteissa pyörähdyskappaleisiin tai vakioprofiilin omaaviin ”pursotuskappaleisiin”. Näiden kappaleiden muodot saadaan määrittelemällä aluksi janoista koostuva geometrinen kuvio, joka sitten pyöräytetään määritellyn akselin ympäri tai siirretään suoraan viivaisesti haluttuun suuntaan kappaleen pintojen muodostamiseksi.

Geometrialtaan monimutkaisemmat kappaleet on mallinnettava erillisillä, kolmiulotteiseen suunnitteluun tarkoitetuilla ohjelmilla. Nämä tarjoavatkin yleensä hyvät työkalut erilaisten muotojen tuottamiseksi. Siten tarkastuskohte voi sisältää monimutkaisia muotoja ja sen mallinnus voidaan tehdä tarkasti. Periaatteessa tarkastuskohteiden ja vikojen mallinnukseen voidaan käyttää mitä tahansa kaupallista ohjelmistoa. Mallinnettujen geometrinen muotojen siirto simulointiohjelmaan on mahdollista kuitenkin vain ”raw triangles” -tallennusmuodossa, jossa kappaleiden kaikki pinnat esitetään kolmikulmaisten tasojen avulla. Näin ollen mallit joudutaan ainakin viemään sellaisen mallinnusohjelman läpi, jossa tämä tallennusmuoto on käytettävissä.

Tarkastuskohteeseen sijoitettavien vikaheijastajien geometrinen muoto on myös mallinnettava erikseen. Käyttämällä tähänkin tarkoitukseen kolmiulotteisten kappaleiden suunnitteluun tarkoitettua ohjelmaa voidaan niiden muodot määritellä pikkutarkasti. Heijastajat voidaan sijoitella valmiiksi haluttuihin kohtiin tarkastuskohteen mallia luotaessa. Myös simulointiohjelman avulla on mahdollista tuoda jälkikäteen tarkasteltavaan kohteeseen vikaheijastajia ja liikutella niitä haluttuihin kohtiin ja asentoihin.

2.1.4 Luotaus

Anturia voidaan liikutella luotauspinnalla ohjelman ohjauspainikkeiden avulla ”manuaalisesti”. Näin voidaan tutkia luotauksen toimintaedellytyksiä sen eri vaiheissa. Samalla saadaan helposti määritettyä koordinaatit, joiden avulla haluttu alue tarkastuskohteesta saadaan katettua.

Ohjelmassa on käytettävissä ”virtuaalinen skanneri”, jonka avulla voidaan tehdä ”mekani-soitu” luotaus. Luotausliikkeiden akselit, askel-luksen ja näytteenottopisteiden välien suuruudet

ovat määriteltävissä vapaasti. Ohjelmassa on suoraan käytettävissä yksinkertaisia skannerirakenteita, joilla luotaus pystytään tekemään taso- ja pyörähdyspinnoilla. Erillisen määrittelykielen avulla voidaan rakentaa monimutkaisiakin skannerirakenteita, jotka sisältävät useita akseleita ja liikemahdollisuuksia.

Luotaustapahtuman havainnollistamiseksi anturin liikerata voidaan piirtää näkyviin kappaleen pinnalle sitä mukaan kuin luotaus edistyy, kuten kuvassa 2 on esitetty. Liikerata ja sen sisältämät näytteenottopisteet voidaan myös tallentaa ASCII-muotoisena tiedostona myöhempää käyttöä varten.

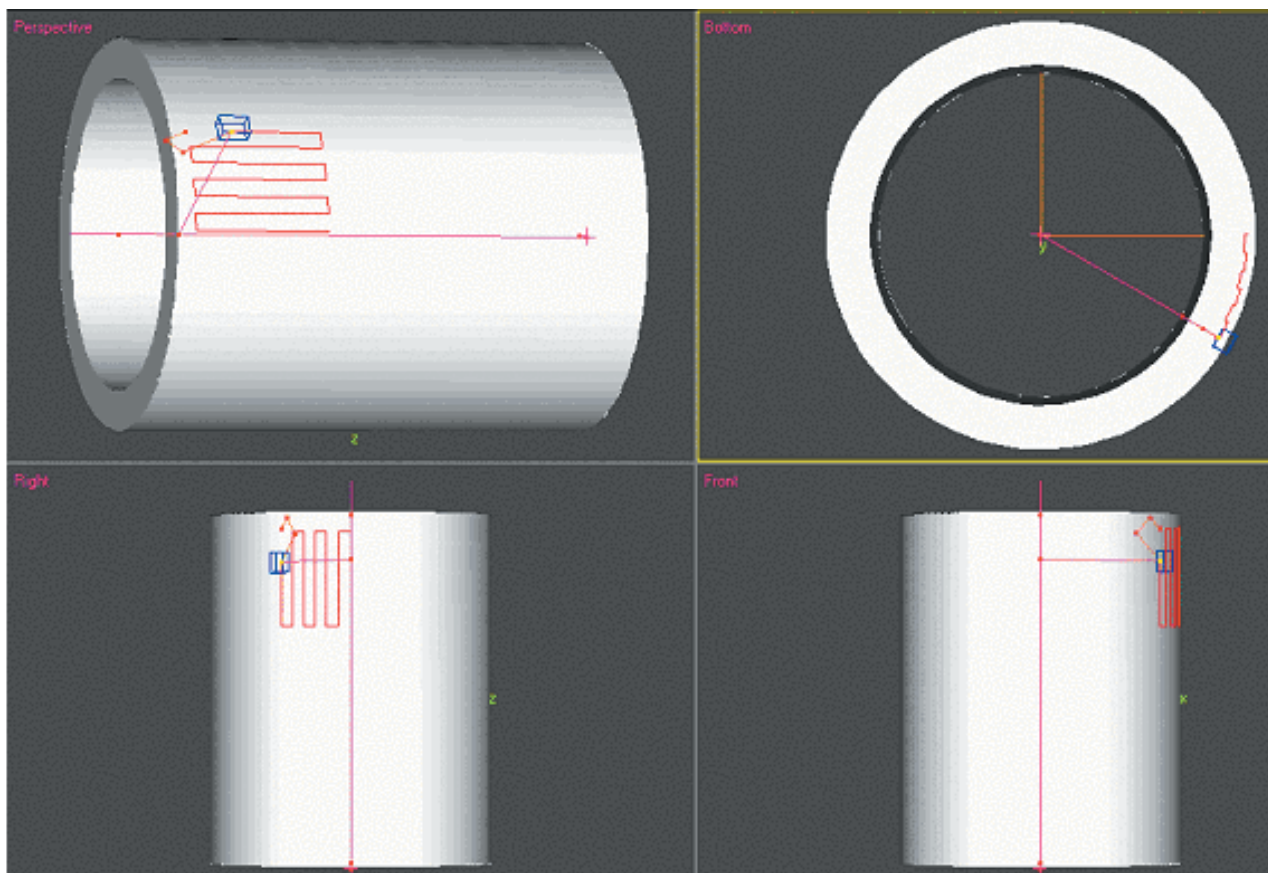
2.1.5 Luotaustulosten esittäminen

Luotaimesta lähtevän äänisäteen tai -keilan kulua voidaan kaikissa tilanteissa tarkastella visuaalisesti ja nähdä sen käyttäytyminen tarkastusalueella ja mahdollisten heijastajien kohdalla. Koska käytettävissä on samanaikaisesti eri projektioiden tarjoamat näkymät, saavutetaan hyvä

havainnollisuus. Tilanteessa, jossa ääni palaa takaisin anturiin muuttuu sen väri merkiksi siitä, että kyseisessä tilanteessa havaitaan ”kaiku”. Kuvassa 3 on kaksi esimerkkiä erilaisista luotaustilanteista.

”Tarkastustulos” voidaan esittää näytöllä, joka muistuttaa tavallisen ultraäänilaitteen A-kuvaa, kuva 4. Äänen etenemistä kuvaavan säteen tai säteiden osuessa takaisin luotaimen alapinnalle A-kuvassa on nähtävissä ”kaikupiikki”. Kaiku muodostetaan äänitien pituuden edellyttämälle kohdalle ja sen korkeuden määrittämiseen käytetään säteen kulkeman matkan ja materiaalille annetun vaimennuskertoimen tuloa.

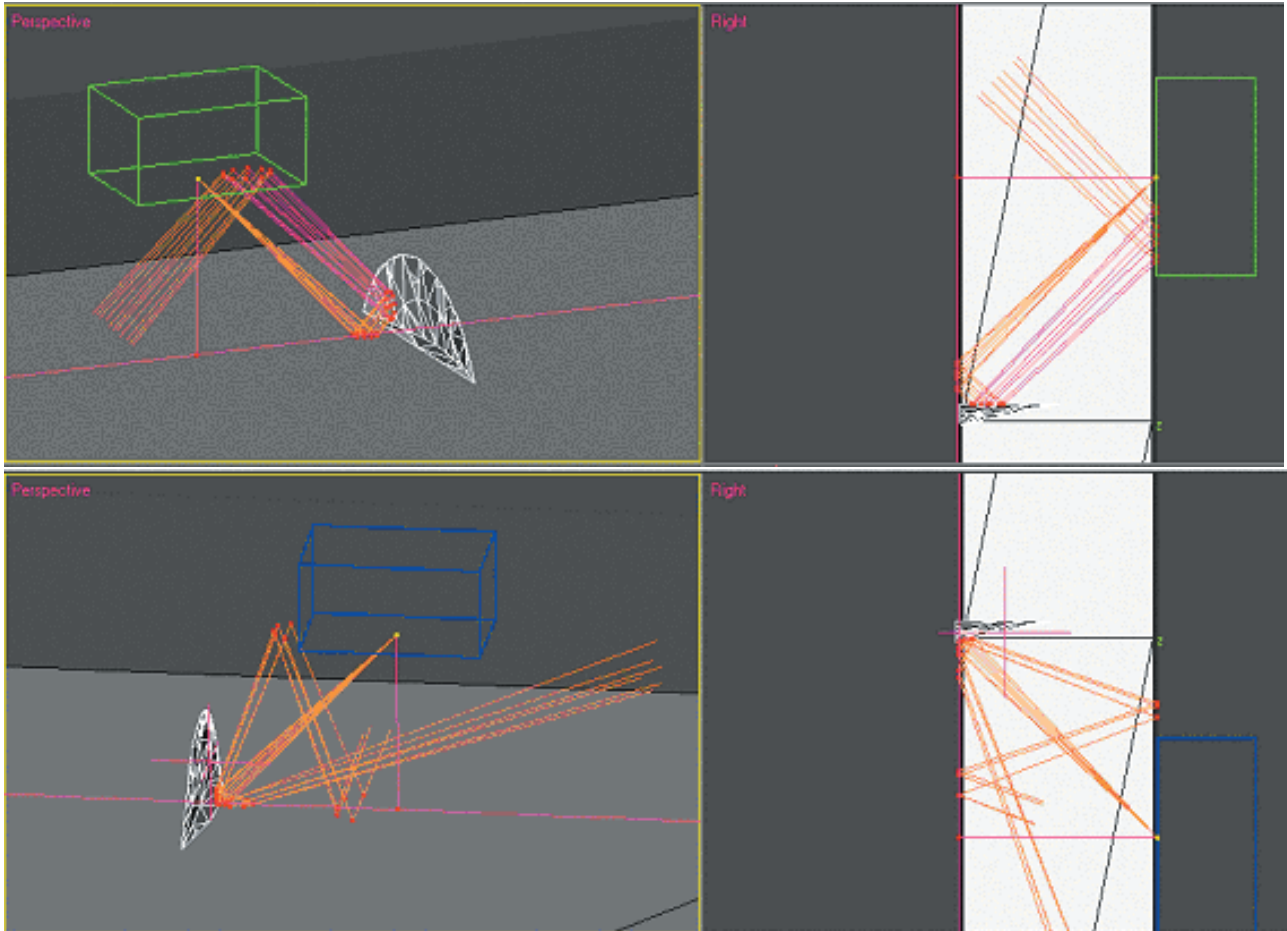
Mekanisoidun ultraäänitarkastuksen tulokset esitetään yleensä C-, B- ja D-kuvien avulla. Näissä kuvissa rekisteröidyt kaikukorkeudet havainnollistetaan väreillä ja sijoitetaan äänitie-etäisyytensä ja luotaimen suuntakulman perusteella heijastajan sijaintikohtaan kappaleen geometriassa. Kun kuvaus esitetään kolmessa eri projektiossa saadaan melko havainnollinen käsitys heijastajan



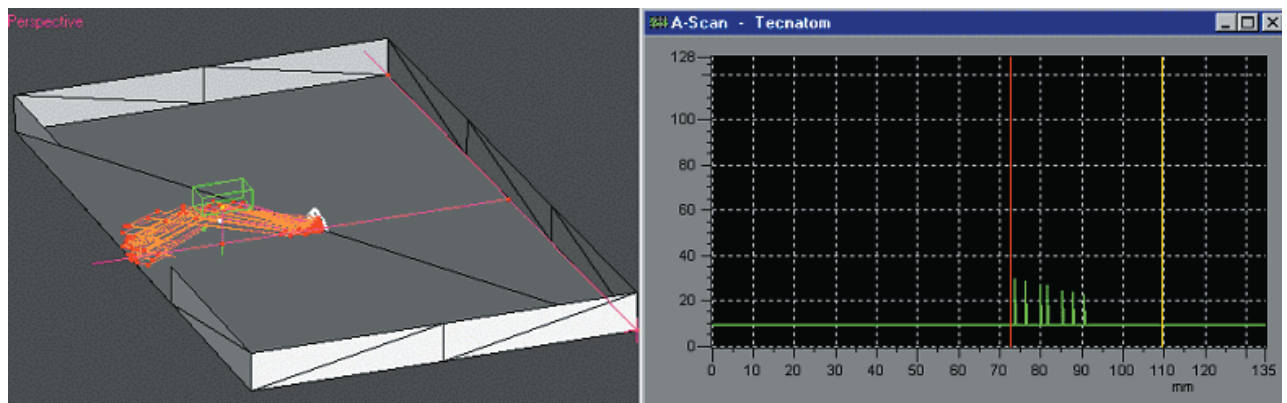
Kuva 2. Putkimaisen kappaleen ”mekanisoitu” luotaus simulointiohjelman avulla. Luotauksen toimintaedellytyksiä voidaan tarkastella samanaikaisesti eri projektioissa ja piirtää näkyviin anturin käyttämä liikerata.

sijainnista ja kaikukuvioita voidaan käyttää hyväksi heijastajan koonmäärittämisessä. Ohjelma pystyy tuottamaan simuloitujen luotausten tuloksena samantapaisia, tosin useassa tapauksessa

varsin kaavamaisia C-, B- ja D-kuvia. Heijastajista saatavien näyttämien muotoon vaikuttaa josain määrin se, miten luotaimen äänikeila on mallinnettu simulointia tehdessä.



Kuva 3. Esimerkki luotauksen havainnollistamisesta. Ylemmässä kuvaparissa äänikeila osuu heijastajan suoraan pintaan, josta se heijastuu nurkkaheijastuksen kautta takaisin luotaimen alapintaan, jolloin havaitaan "kaiku" (luotaimen väri muuttuu vihreäksi). Alemmassa kuvaparissa äänikeila osuu heijastajan kaarevaan ja vinossa olevaan pintaan, jolloin keila jakautuu ja heijastuu kahteen suuntaan. Kumpikaan heijastuneista äänikeiloista ei osu anturin alapintaan eikä "kaikua" havaita (luotaimen väri pysyy sinisenä).



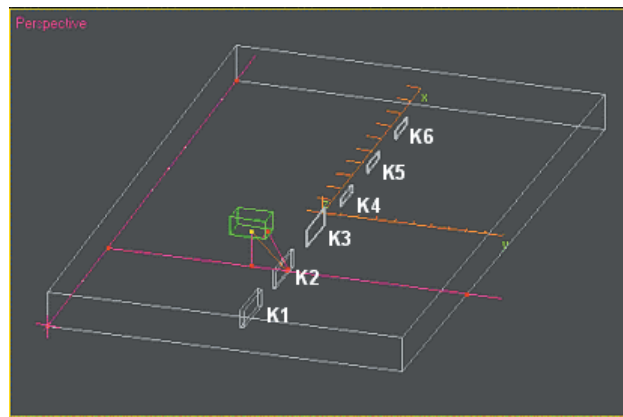
Kuva 4. Vasemmassa kuvassa ääni heijastuu viasta ja osuu luotaimen. Oikealla on nähtävissä simulointiohjelman piirtämä A-kuva. A-kuvan näyttämät on esitetty kaikupiikkeinä eri säteiden käyttämien ääniteiden edellyttämässä paikoissa. Äänitien piteneminen vaikuttaa myös hieman havaittuun kaikukorkeuteen.

C-, B- ja D-kuvien muodostamiseksi luodattiin kuvassa 5 kaaviomaisesti esitetty yksinkertainen koekappale, joka sisältää kuusi heijastajaa (K1...K6). Tämän koekappaleen heijastajat olivat kiekkomaisella elektrodilla tehtyjä uria, joiden toinen seinämä oli suora ja toinen kaareva ja kallistunut. Heijastajien periaatteellinen muoto on nähtävissä kuvassa 3. Heijastajat K1...K3 ovat samankokoisia, mutta K1:n kaarevan seinämän kaarevuus ja kallistus on suurin ja K3:n vastavasti pienin. Heijastajat K4...K6 ovat muodoltaan vastaavanlaisia, mutta kooltaan pienempiä heijastajia. Koekappale (PL 1) on kuvattu yksityiskohtaisesti raportissa Sarkimo et al. (1999).

Tulokset edellä kuvatun koekappaleen (PL 1) simuloidusta luotauksesta on esitetty C-, B- ja D-kuvien muodossa kuvissa 6 ja 7. Luotaimen äänikela on tässä tapauksessa mallinnettu yksittäisellä säteellä.

Luodattaessa kohti heijastajien K1...K6 suora pintaa muodostui selkeän nurkkaheijastuksen ansiosta näyttämät, jotka näkyvät C- ja D-kuvissa erillisinä kuvioina, kuva 6. B-kuvan projektiossa eri heijastajien näyttämät ovat sen sijaan päällekkäin eivätkä erotu toisistaan. Näyttämät sijoittuvat hyvin tarkasti oikeille kohdille kappaleessa ja niiden pituudet vastaavat hyvin heijastajien pituuksia. Heijastajat K1...K3 ja samoin K4...K6 ovat niiden suoralta puolelta katsottuna keskenään tarkalleen samanlaisia, joten niistä saatavien näyttämienkin tulee olla identtisiä. Tämä seikka toteutui hyvin.

Kuvassa 7 on esitetty vastaava tulos, C-, B- ja D-kuvan muodossa, kun luotaus tehtiin kohti heijastajien kaarevaa ja kaltevaa pintaa. Verrattuna edellisessä kuvassa esitettyyn simulointiin suurennettiin tässä tapauksessa anturin pohjan kokoa pituus- ja leveyssuunnassa 10 mm, jotta kyettiin ”havaitsemaan” paremmin heijastuvat säteet. Tästä huolimatta jäivät näyttämät heijastajista K1 ja K4, joiden pinta oli kaikkein kaarevin ja eniten kallistunut, C-kuvassa tarkasteltuna melko heikoiksi. Tässä tapauksessa olivat kaikki luodattut heijastajat keskenään erilaisia, mikä näkyy tuloksessa. Heijastajan pinnan kaarevuus näkyy tuloksissa näyttämän kaareutumisena. D-kuvasta nähdään myös, että näyttämät eivät paikannu tarkasti kappaleen pohjapinnalle kuten pitäisi.

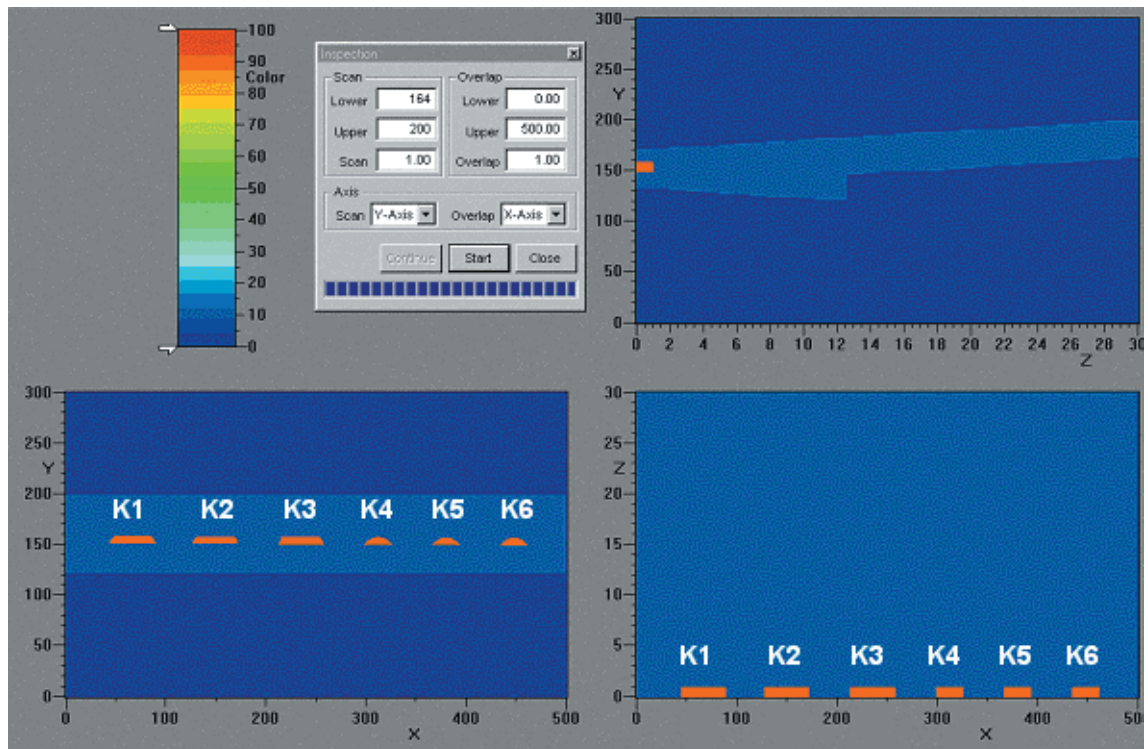


Kuva 5. Koekappaleen (PL 1) luotaus nähtynä simulointiohjelman esittämänä. Kappaleeseen sijoitetut heijastajat näkyvät oikeilla paikoillaan ja ne on merkitty tunnuksilla (K1...K6). Kuvassa heijastajaan K2 osuva ultraäänisäde heijastuu takaisin luotaimeen.

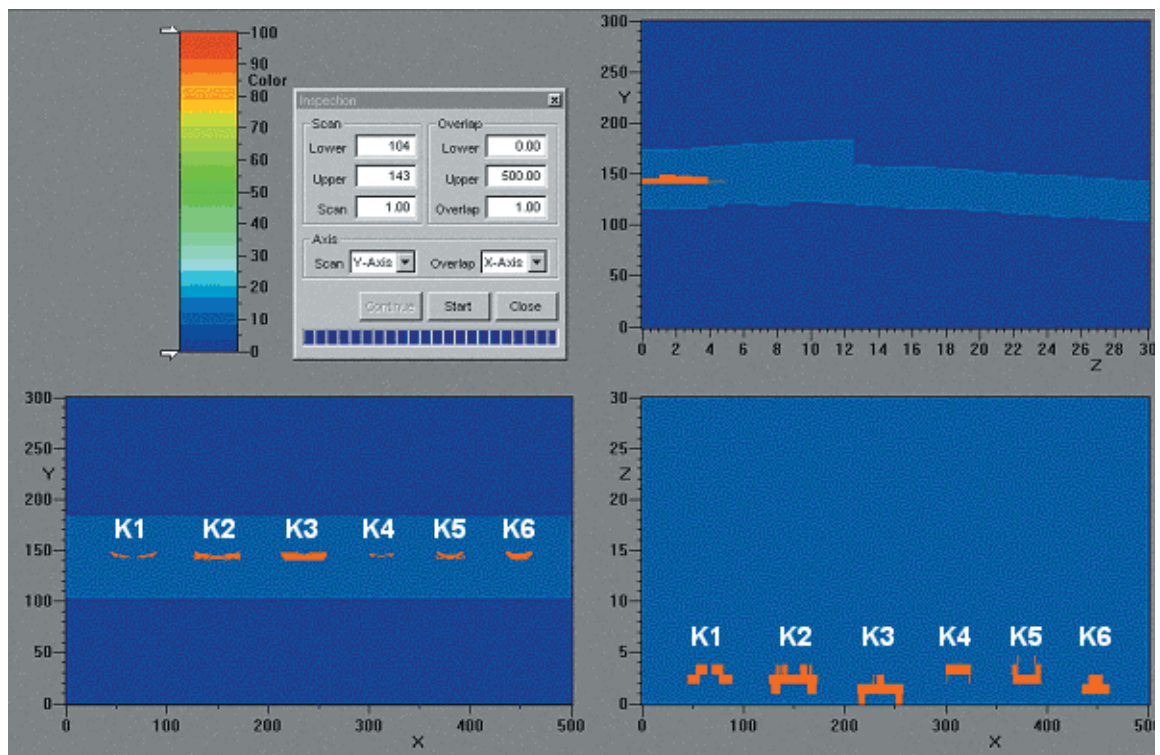
2.1.6 Muut ominaisuudet

Simulointiohjelma sisältää toiminnon (Vision map), jonka avulla voidaan selvittää käyttökelpoiset luotausalueet tietyn heijastajan havaitsemiseksi. Heijastajan sijainnin ja suuntautuneisuuden lisäksi määritellään, millaisilla kohtauskulmilla ultraääninen on osuttava heijastajaan. Näiden ehtojen puitteissa ohjelma laskee kaikki mahdolliset luotaimen sijaintikoordinaatit, joista heijastaja on mahdollista havaita annettujen ehtojen puitteissa. Samalla saadaan kuhunkin havaintopisteeseen liittyvä luotaimen suunta- ja sivuttaiskulman suuruus sekä äänitien pituus. Tulokset voidaan esittää myös karttoina, jotka havainnollistavat käyttökelpoiset luotausalueet. Niissä on eri väreillä ilmaistu tarvittavat luotaimen suunta- ja sivuttaiskulmat.

Ohjelma sisältää lisäksi erillisiä työkaluja, joiden avulla voidaan tutkia, mitkä osat tarkastusalueesta tulevat luotauksessa katettua. Simuloidussa tarkastuksessa anturista lähtevien säteiden jäljet voidaan piirtää näkyviin kappaleen sisään havainnollistamaan tarkastettua tilavuutta. Kappaleen pintaan saadaan näkyviin pisteet, joilla havainnollistetaan näytteenottopisteitä luotauksen edistyessä. Edelleen tarkastettava kohde voidaan jakaa tilavuusalkioihin ja tarkistaa ohjelman avulla, kuinka suuri osa alkioista tulee käytyä läpi määritellyn luotaustekniikan avulla.



Kuva 6. Koekappaleen (PL 1) luotaus heijastajien suoraa puolta kohti. Luotaimen suuntakulma on 45° ja sen äänikeilaa on simuloitu yksittäisellä säteellä. Anturin pohjan koko on 30×20 mm (pituus \times leveys).



Kuva 7. Koekappaleen PL 1 luotaus heijastajien kaarevaa puolta kohti. Luotaimen suuntakulma on 45° ja sen äänikeilaa on kuvattu yksittäisellä säteellä. Anturin pohjan koko 40×30 mm (pituus \times leveys).

2.2 Vaativan geometrian tarkastelu sädemenetelmän avulla

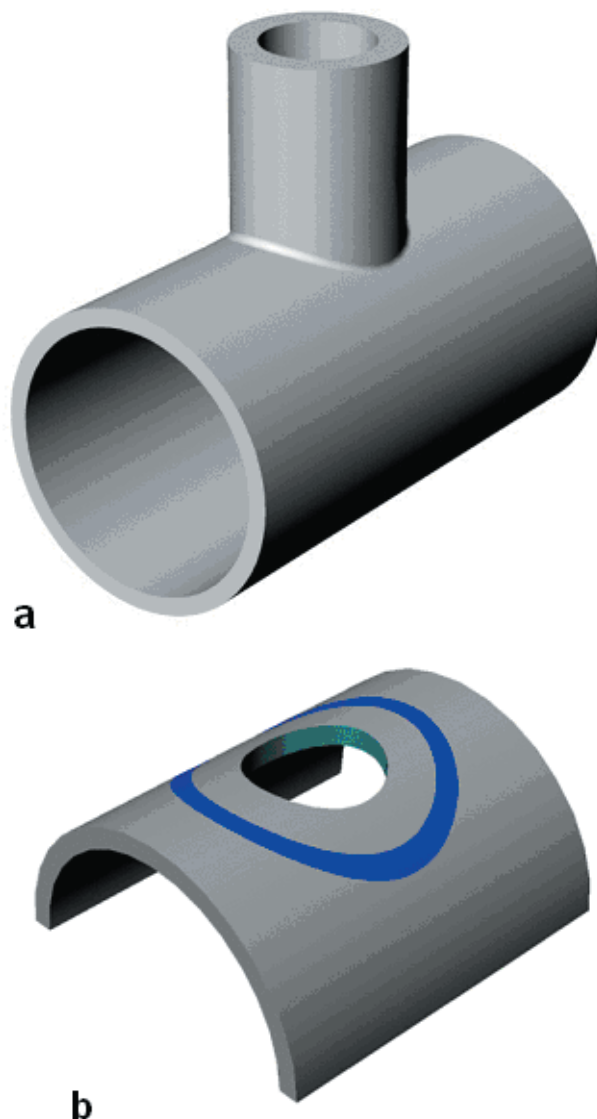
Geometrialtaan vaikeasti hahmotettavien kohteiden ultraääniluotauksen suunnittelu ja toimivuuden tarkistaminen on monissa tapauksissa työlästä. Tyypillisimpiä esimerkkejä tällaisista geometrioista ovat putkiyhteiden muodostamat tilanteet. Varsinkin yhteen halkaisijan ollessa suuri itse pääputkeen verrattuna syntyy geometria, joka muuttuu voimakkaasti liikuttaessa yhteen ja putken välistä liitosta pitkin. Luotauksilanteen hahmottaminen esimerkiksi piirroksin vaatii useiden leikkausten tutkimista ja muodostuu työlääksi. Toisaalta leikkausten konstruointi pääleikkaussuunta lukuun ottamatta on hyvin hankalaa.

Tässä luvussa on esimerkin avulla esitetty mahdollisuuksia, joita sädemenetelmään perustuva simulointiohjelma tarjoaa hankalasti hahmotettavan luotausgeometrian havainnollistamisessa.

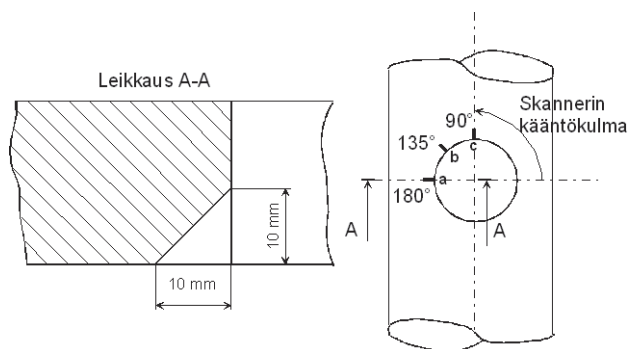
2.2.1 Simuloinnin tarkastustilanne

Simuloinnin kohteeksi valittiin putkiyhde, jonka mittasuhteet vastaavat todellista, käytännössä esiintyvää kohdetta. Kuvassa 8 on esitetty yhteen geometrinen malli. Tarkastusalue, jota simuloinnin avulla haluttiin tutkia oli yhteen sisäkulman pyöristys. Oletetut viat tarkastusalueella olivat säteittäisiä sisäkulmasta alkavia säröjä (kuva 9). Sisäpinnan pyöristys on suunniteltu tarkastettavaksi ultraääniluotauksella pääputken pinnalta.

Koska yhdeputkea ei käytetä luotauksessa hyväksi, se voidaan jättää pois tarkastusalueelta mallinnettaessa. Tarkastustilanne muuttuu tapaukseksi, jossa putkeen on tehty aukko ja halutaan tarkastaa aukon sisäkulman alue. Yhdeputki ja sen hitsi rajaavat aukon ympäriltä alueen, jota luotauksessa ei voida käyttää hyväksi. Kuvassa 8b on esitetty simuloinnissa käytetty kohteen geometrinen malli, jossa yhdeputki on jätetty pois ja myös putken alaosa on leikattu mallin koon pienentämiseksi. Tämän geometrisen mallin pinnalle on merkitty tummalla renkaalla luotaukseen käytettävissä oleva alue. Luotaimen liikkussa ja kääntyessä tällä alueella putken pinnalla on siitä suuntautuvan äänikeilan suuntaa erittäin hankalaa arvioida ja todentaa ilman kolmiulotteisen mallinnuksen apua.



Kuva 8. (a) Simuloinnin kohteena olleen tarkastusalueen yleiskuva. (b) Simuloinnissa tarvittava segmentti pääputkesta ja yhdeaukko, luotaukseen käytettävissä oleva alue on merkitty tummalla värillä.



Kuva 9. Vikaheijastajien muotoilu ja sijoittelu tarkastusalueelle.

2.2.2 Vikaheijastajat

Simuloitu tarkastus tehtiin säteittäisten särömaisten vikojen havaitsemiseksi yhdeaukon sisäkulmassa. Tämän tilanteen jäljittämiseksi asetettiin yhdeaukon sisäkulmaan kolme kolmioista heijastajaa (kuva 9). Heijastajat sijaitsivat yhdeaukon kulmassa putkeen nähden sen "sivulla" ("a", 180°), "päällä" ("c", 90°), ja näiden aseimen välissä ("b", 135°). Heijastajien sijainnin määrittelyssä näkyvät asteluvut viittaavat käytössä olleen virtuaalisen skannerin kääntökulmaan.

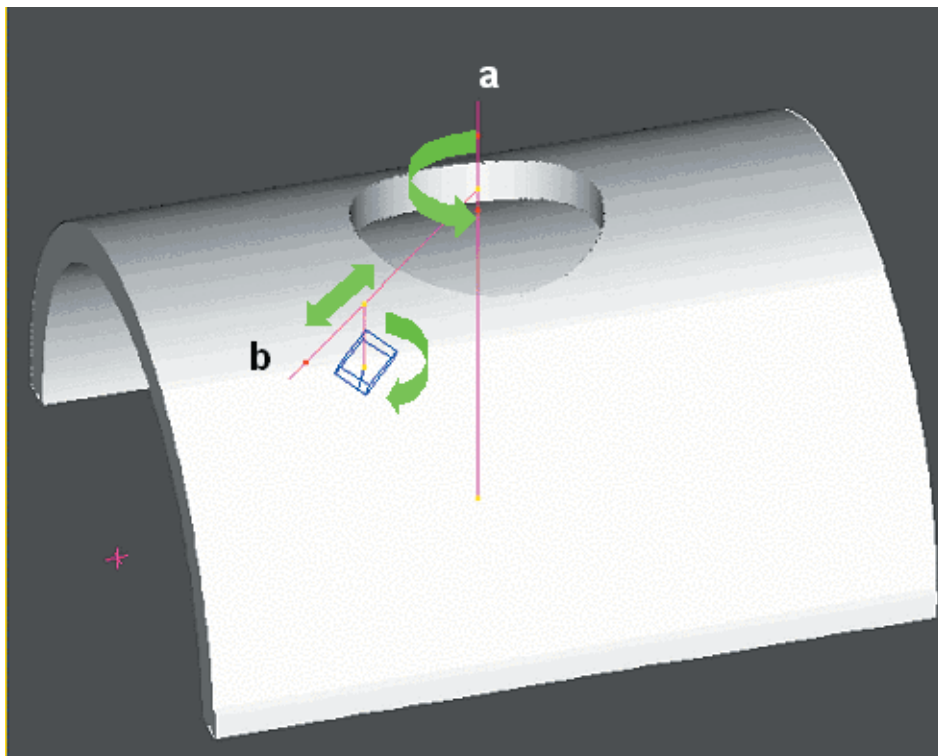
2.2.3 Geometrian mallinnus

Tarkastuskohteen geometrinen malli luotiin Rhinoceros 1.0 ohjelmalla. Tällä ohjelmalla malli tallennettiin muodossa, jossa kaikki pinnat esitetään kolmiopintoina (raw triangles), ja siirrettiin ultraääniluotausta simuloivaan ohjelmaan. Tarkastuskohteen pinta, jolla luotain liikkuu (putken ulkopinta), haluttiin mallintaa mahdollisimman tarkasti, jotta virheet luotaimen asennossa ja liikkeissä jäisivät pieniksi. Tämän vuoksi pinta muodostettiin pienistä kolmioista, jolloin tiedostokoko kasvoi suhteellisen suureksi (noin 4,3 MB). Tämä tiedostokoko toimii kuitenkin vielä hyvin ultraääniluotauksen simulointiohjelmassa.

Yhdeaukon sisäkulma on todellisuudessa aina pyöristetty. Tämän pyöristyksen lisäämistä geometriseen malliin kokeiltiin käyttäen pyöristys-sädetä $r = 5$ mm. Käytännössä tämä lisäys kasvatti kolmioilla esitetyn geometrisen mallin tiedostokoon kymmenkertaiseksi (47 MB). Näin suuren tiedostokoon käsittely ultraääniluotauksen simulointiohjelmalla ei ollut käytännössä mahdollista ja pyöristystä ei voitu sisällyttää malliin. Toisaalta simuloinnin ensisijaisena päämääränä oli todentaa äänikeilan kohdistuminen oikealla tavalla tutkittavaan tarkastusalueeseen, mihin pyöristyksen poisjättämisellä ei ollut vaikutusta.

2.2.4 Virtuaalinen skanneri ja luotaimen asemointi

Luotaimen liikuttamiseksi ja sen paikan täsmällistä määrittelyä varten luotiin virtuaalinen skanneri (kuva 10). Tämän skannerin pystyakseli (a) sijaitsi yhdeaukon keskellä. Pystyakselista lähti aukon säteen suuntainen varsi (b), jonka sijainti määriteltiin kiertokulman avulla. Säteen suuntaisesta akselista lähti kappaleen pintaa kohti pystysuora akseli, joka sijoitti päässään sijaitsevan luotaimen automaattisesti kappaleen pinnalle. Tämän pystyakselin sijaintia säteen suuntaisella akselilla voitiin säätää ja määritellä siten luotai-



Kuva 10. Virtuaalisen skannerin akselit on esitetty punaisilla viivoilla. Pystyakseli (a) on sijoitettu aukon keskelle; säteen suuntainen akseli (b) kiertyy pystyakselin ympäri; pystyakseli, jonka päässä luotain sijaitsee, pääsee liikkumaan säteen suuntaista akselia pitkin.

men etäisyys aukon keskipisteestä. Lisäksi kääntelykulmaa säätämällä luotainta voidaan kääntää putken pinnalla haluttuun asentoon.

Toteutetussa simulointiesimerkissä katsottiin, että yhdeputki ja sen hitsi vaativat tilan, joka ulottuu 160–165 mm:n etäisyydelle aukon keskipisteestä. Näin ollen määritettiin luotaimen keskipisteen paikka sijaitsemaan aina 180 mm:n päähän aukon keskipisteestä, jolloin luotaimen etureuna olisi käytännössä lähes kiinni hitsissä.

Simuloinnissa tutkittiin luotaustilannetta, jossa kulmaheijastuksen avulla saataisiin näyttämä säteittäisestä vikaheijastajasta. Tällaisen näyttämän saamiseksi katsottiin luotaustilanteen olevan edullisimmillaan silloin, kun äänikeila osuu 45°:n kulmassa heijastajan ja aukon muodostamaan kulmaukseen. Kun tilannetta tarkastellaan projektiossa suoraan aukon yläpuolelta, tulee simuloinnissa käytetyillä ehdoilla skannerin varren olla kiertynyt 21° sivuun itse heijastajan suunnasta (kuva 11).

2.2.5 Simulointimenetelmä

Simuloinnissa käytettiin samaa Midas Simulation Ray-Tracing, -ohjelmistoa, jonka toimintaa on kuvattu tarkemmin edellisessä luvussa.

Ultraäänen etenemistä kuvattiin mallinnuksessa yhdellä ”säteellä”, jonka avulla voidaan tarkastella äänikeilan keskiakselin teoreettista suuntautumista luotauksen aikana. Simuloinnissa tarkasteltiin etupäässä äänikeilan suuntautumista tarkastusalueelle ja mahdollisimman tarkasti heijastajan ja aukon muodostamaan kulmaukseen. Äänen etenemistä kuvaavan säteen heijastumista takaisin ei simuloinnissa pidetty yhtä tärkeänä. Äänen voidaan olettaa heijastuvan mel-

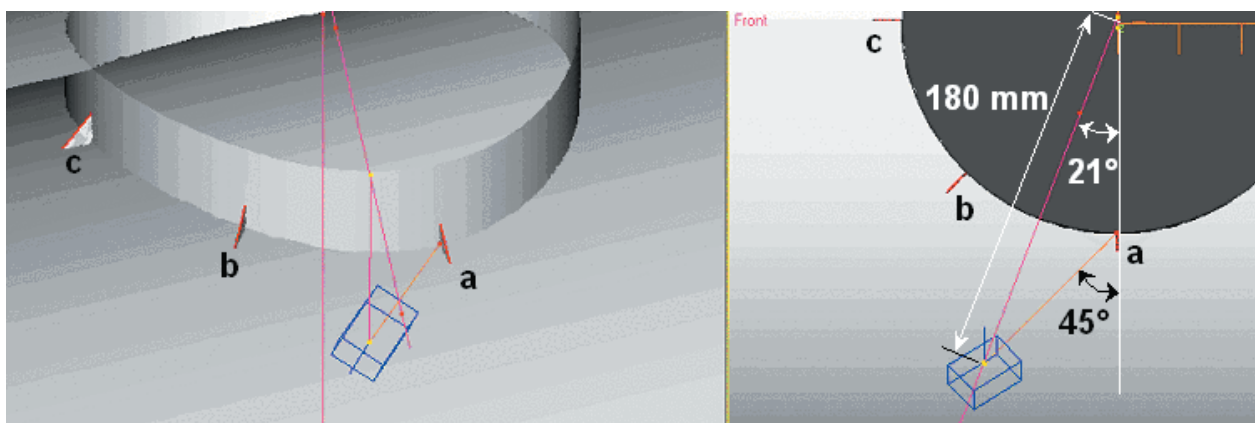
ko hyvin takaisin tällaisesta kulmauksesta, kun ääni suunnataan siihen 45°:n kulmassa. Tällöin näyttämän muodostuminen on hyvin todennäköistä, vaikkei simuloinnin teoreettinen tarkastelu tältä osin onnistuisikaan.

Tapoja, joilla äänikeilan suuntautumista voidaan kuvata luotaimen liikkua tai kääntyessä, on esitetty kuvissa 12 ja 13. Luotain on näissä kuvissa kohdistettu heijastajaan ”a”. Sen jälkeen on näytetty, miten äänikeila suuntautuu, kun sitä käännellään tässä pisteessä puolelta toiselle.

Äänikeilan suuntautuminen voidaan esittää joko viivoilla tai pisteillä. Viivaesityksessä saadaan näkyviin keilan keskiakselit eri vaiheissa. Esitettävän äänitien pituutta voidaan säädellä mukaan otettavien hyppäysten (äänen heijastuspisteiden) lukumäärää muuttamalla. Kuvassa 12a on otettu mukaan vain äänitie anturista ensimmäiseen heijastuspisteeseen. Vastaavasti kuvassa 12b on otettu mukaan seuraava äänitien osuus ensimmäisen heijastuksen jälkeen. Viivojen asemasta simuloinnissa voidaan esittää äänen osumiskohdat rajapintoihin pisteiden avulla. Tämän esitysmuodon käytöstä ovat esimerkkeinä kuvat 13a ja 13b.

2.2.6 Luotauskulmien optimointi

Simuloinnin avulla etsittiin aluksi kunkin heijastajan osalta mahdollisimman hyvä luotaustilanne. Anturin suuntakulmaa ja kääntelykulmaa säätämällä kohdistettiin keilan keskiakseli tarkasti aukon ja heijastajan muodostamaan nurkkaukseen. Anturin paikan määrittelyssä noudatettiin kohdassa 2.2.4 asetettuja ehtoja, joiden mukaan luotaimen tulee sijaita 180 mm:n etäisyydellä aukon keskipisteestä ja keilan tulee suuntautua



Kuva 11. Luotaustilanne ja vikojen sijoittelu malliin. Vasemmalla kolmiulotteinen näkymä ja oikealla tilanne suoraan ylhäältä nähtynä.

Taulukko I. Optimikulmat eri heijastajien luotauksessa.

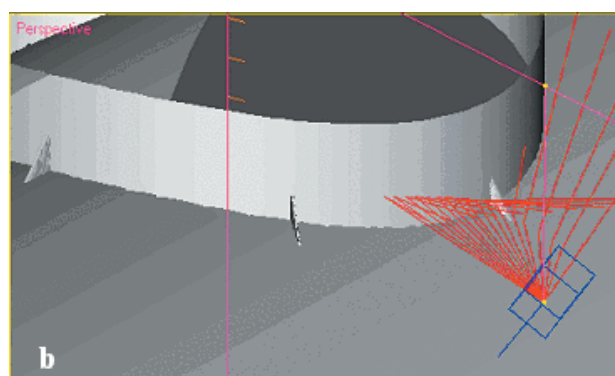
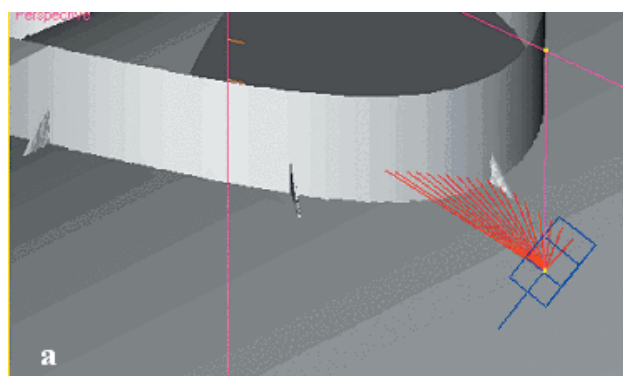
Heijastaja	Suuntakulma	Kääntelykulma	Äänen heijastuminen
"a"	64,6°	26,2°	Säde palaa luotaimeen
"b", alapuolelta	59,2°	-28,7°	Säde ei palaa luotaimeen
"b", yläpuolelta	69,4°	30,1°	Säde ei palaa luotaimeen
"c"	64,4°	-21,3°	Säde palaa luotaimeen

45°:n kulmassa heijastajan muodostamaan soppeen. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty kaksi esimerkkiä näiden tarkastelujen tuloksista. Kuvissa äänikeilan keskiakselin kulkureitti näkyy oranssina viivana ja säteen heijastuspisteet punaisina pisteinä.

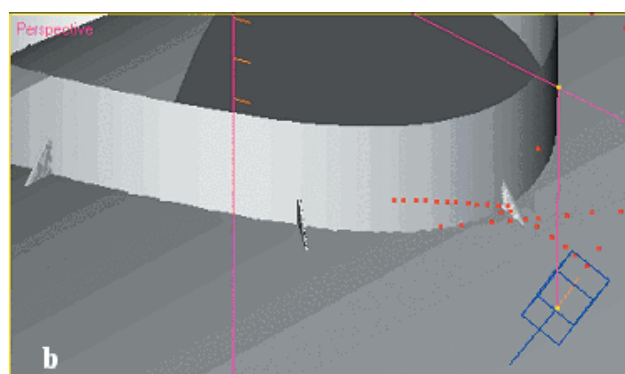
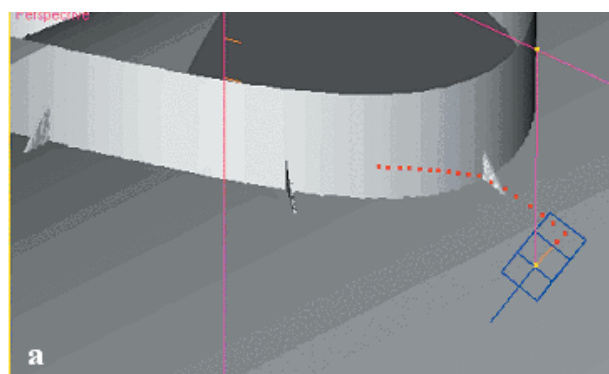
Taulukkoon I on koottu luotaimen suuntakulmien ja kääntelykulmien arvot, joilla äänikeilan keskiakseli saatiin suunnattua mahdollisimman hyvin heijastajien ja yhdeaukon muodostamiin kulmauksiin. Luotaimen suuntakulmat on saatu suoraan simuloinnin luotainmäärityksistä ja ne on nähtävissä simulointikuvissa "Probe/Angle" ruuduissa. Simulointikuvien kääntelykul-

man ("Probe/Skew") arvo 180° suuntaa simuloinnissa keilan suoraan kohti aukon keskipistettä. Sen vuoksi simuloinnin "Probe/Skew"-ruuduissa näkyvistä arvoista on vähennetty 180°. Näin saatu arvo osoittaa, kuinka paljon keila on suunnattava sivuun aukon keskipisteeseen osoittavalta linjalta.

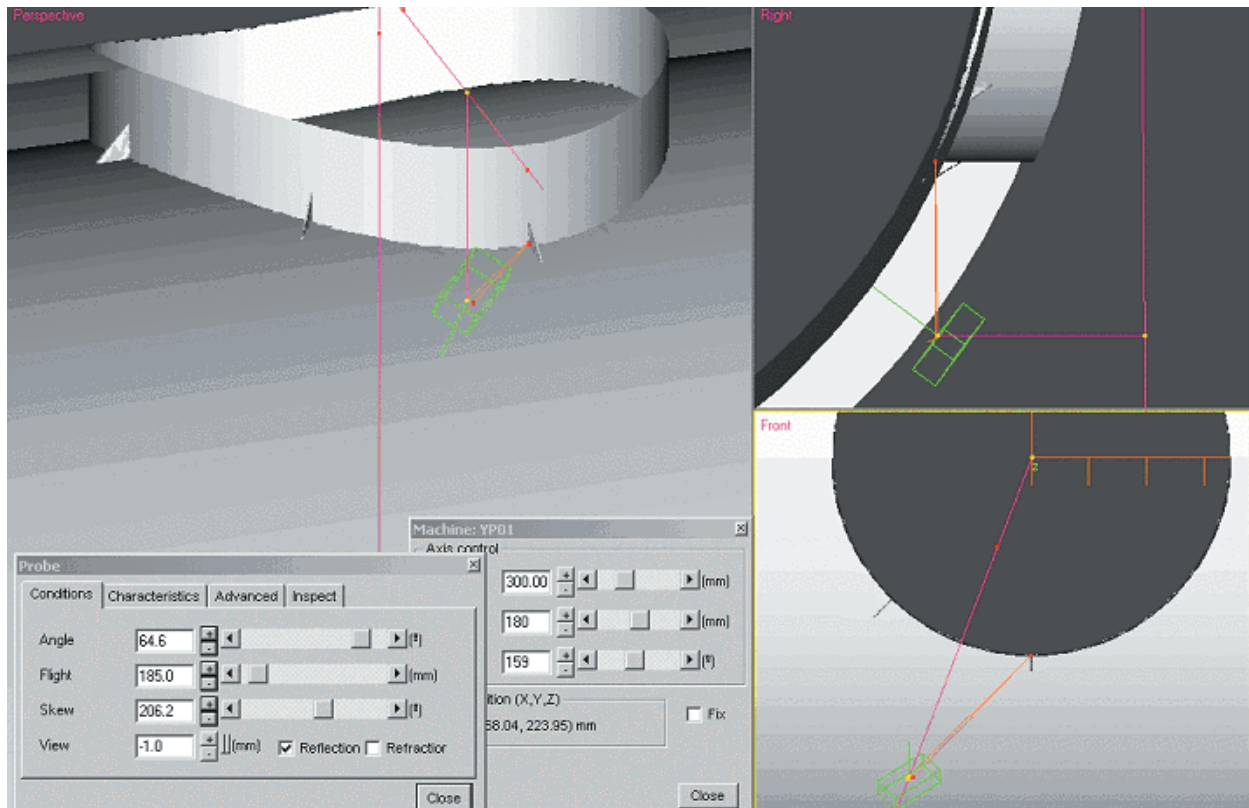
Taulukko I osoittaa, että yhdellä luotaimella ei kyetä kattamaan parhaalla mahdollisella tavalla aukon eri kohtiin sijoittuneita heijastajia, enimillään optimaalisen luotaimen suuntakulman ero on noin 10°. Heijastajien "a" ja "c" luotaukseen sopii yksi, suuntakulmaltaan noin 64,5°:n luotain varsin hyvin. Tähän verrattuna vaatii heijastajan



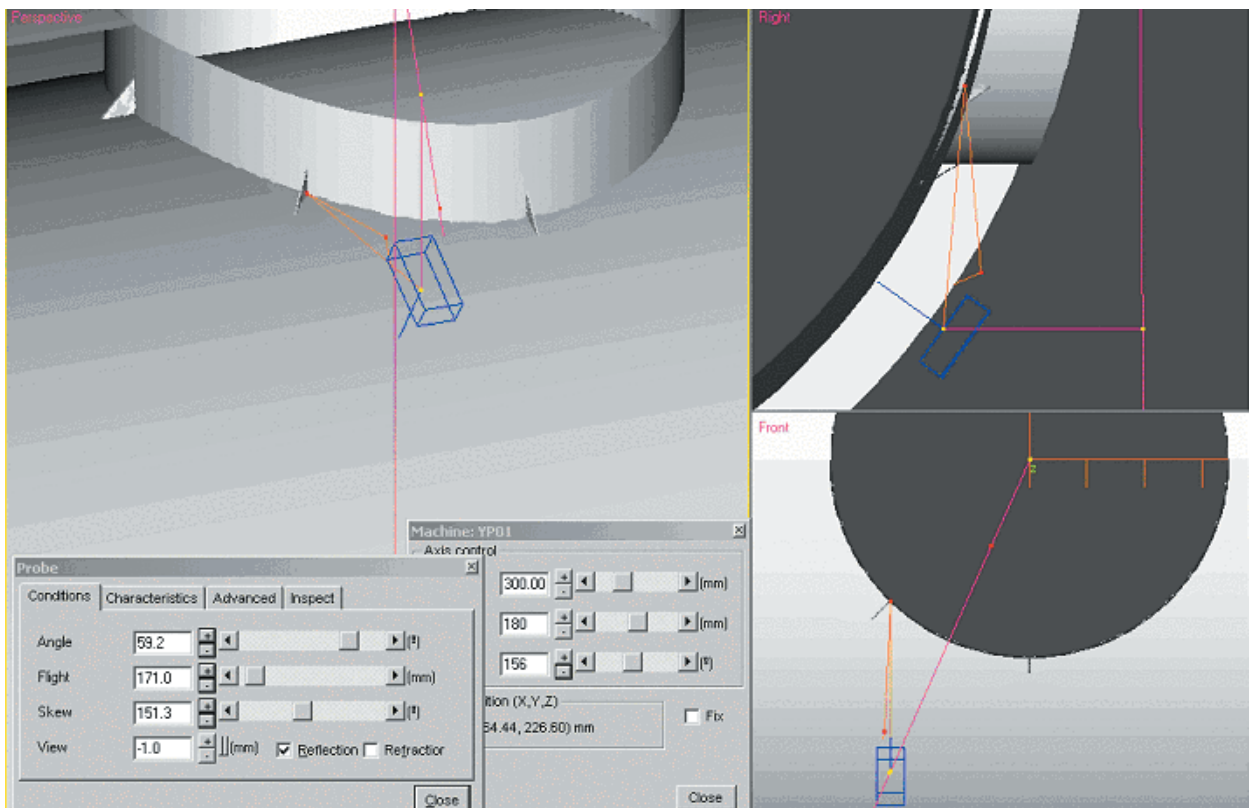
Kuva 12. Äänikeilan suuntautuminen luotainta käännettäessä. Kuvassa a keilan suunta on esitetty viivoilla suoran äänitien osalta. Kuvassa b on otettu mukaan myös ensimmäisen heijastuspisteen jälkeinen äänitien osuus toiseen heijastuspisteeseen saakka.



Kuva 13. Edellinen luotauksutilanne (kuva 12) kuvattuna toisella esitysmuodolla. Kuvassa a näkyy äänikeilan osuapisteet rajapintoihin suoran äänitien jälkeen. Kuvassa b näkyvät myös toisen heijastuksen osuapisteet.



Kuva 14. Heijastajan "a" luotauksen optimointi. Keila suuntautuu heijastajan muodostamaan nurkkaukseen. Luotaimen suuntakulma $64,6^\circ$, kääntelykulma $206,2^\circ$, skannerin kääntökulma 159° ja luotaimen etäisyys aukon keskeltä 180 mm. Äänen etenemistä kuvaava säde palaa luotaimen pohjaan tuottaen "näyttämän".



Kuva 15. Heijastajan "b" luotauksen optimointi "alapuolelta". Keila suuntautuu heijastajan muodostamaan nurkkaukseen. Luotaimen suuntakulma $59,2^\circ$, kääntelykulma $151,3^\circ$, skannerin kääntökulma 156° ja luotaimen etäisyys aukon keskeltä 180 mm. Äänen etenemistä kuvaava säde ei tässä tapauksessa palaa luotaimen pohjaan vaan osuu hieman sen etupuolelle.

”b” luotaus, suunnasta riippuen, noin viisi astetta suuremman tai pienemmän luotaimen suuntakulman.

Kun luotaimen kääntelykulma lasketaan yksinkertaisesti ylhäältä päin tarkastellusta projektioista saadaan tulokseksi 24°. Käytännössä simuloinnin tuottama kääntelykulma poikkeaa tästä arvosta kaikissa tapauksissa, suurimmillaan noin 6°. Kääntelykulman vaihtelu osoittaa, että tilanne muuttuu myös tämän kulman osalta yhdettä kierretessä. Mekanisoidussa luotauksessa optimituloksen saavuttaminen edellyttäisi kääntelykulman säätöä luotaimen liikkeessa yhteen ympäri. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää useampaa kääntelykulman arvoa ja tehdä useita skannauksia yhteen ympäri.

2.2.7 Käsiluotaus

Eräs käytännössäkin sovellettu tapa tarkastaa sisäpyöristykseen alue käsin on seuraava. Luotain viedään pääputken pinnalla mahdollisimman lähelle yhteen hitsiä keilan suuntautuessa yhteen keskipistettä kohden. Tämän jälkeen luotainta käännellään puolelta toiselle (esimerkiksi $\pm 45^\circ$) ja samalla lähdetään kuljettamaan luotainta yhteen ympäri. Yhteen hitsi muodostaa tällöin ohjauspinnan, joka määrittää luotaimen radan yhteen ympäri. Luotauksesta muodostuu monimutkainen tapahtuma, joka sisältää lukemattomia erilaisia tilanteita. Näistä voidaan simuloinnissa valita tarkasteltavaksi kiinnostavat tilanteet, mutta luonnollisesti vain rajallinen määrä tapauksia.

Kuvissa 16–19 on esitetty esimerkit, joissa on simuloitu käsiluotauksessa tehtävää luotaimen kääntelyä sen sijaitessa kohdassa 2.2.4 määritellyssä optimiasemassa. Tuloksen kuvaamiseen on käytetty edellä kuvassa 13a näytettyä esitystapaa. Näissä tarkasteluissa on käytetty luotainta, jonka suuntakulma on 65°.

Käsitarkastuksen simuloinnin esimerkit osoittavat, että 65° luotaimella saadaan äänikeila suunnattua erittäin hyvin heijastajien ”a” ja ”c” kohdalla. Heijastaja ”b”:n kohdalla nähdään selvästi, että tämä luotauskulma ei ole paras mahdollinen. Kun luotaus tapahtuu heijastajan ”alapuolelta” suuntautuu äänikeila selvästi heijastajan yli ja osuu pääasiassa yhdeaukon reunaan. Kun luotaus tehdään taas heijastajan ”yläpuolel-

ta” suuntautuu äänikeila liian jyrkästi alaspäin ja osuu putken sisäpintaan selvästi heijastajan etupuolella. Kuten taulukoon I kootut tuloksetkin osoittavat tarvittaisiin heijastajan ”b” luotauksessa eri kulmilla toimivat anturit luotauksen suunnasta riippuen.

Todellisuudessa äänikeilalla on luotaimen tyyppistä riippuen tietty koko ja avauma, joten sen kuvaaminen keskiakselin kautta piirretyn säteen avulla on hyvin pelkistettyä ja kaavamaisista. Käytännössä luotaus saattaa toimia äänikeilan laajuuden ja avauman ansiosta ainakin tyydyttävästi, vaikka keilan suuntautuminen ei olekaan optimaalinen.

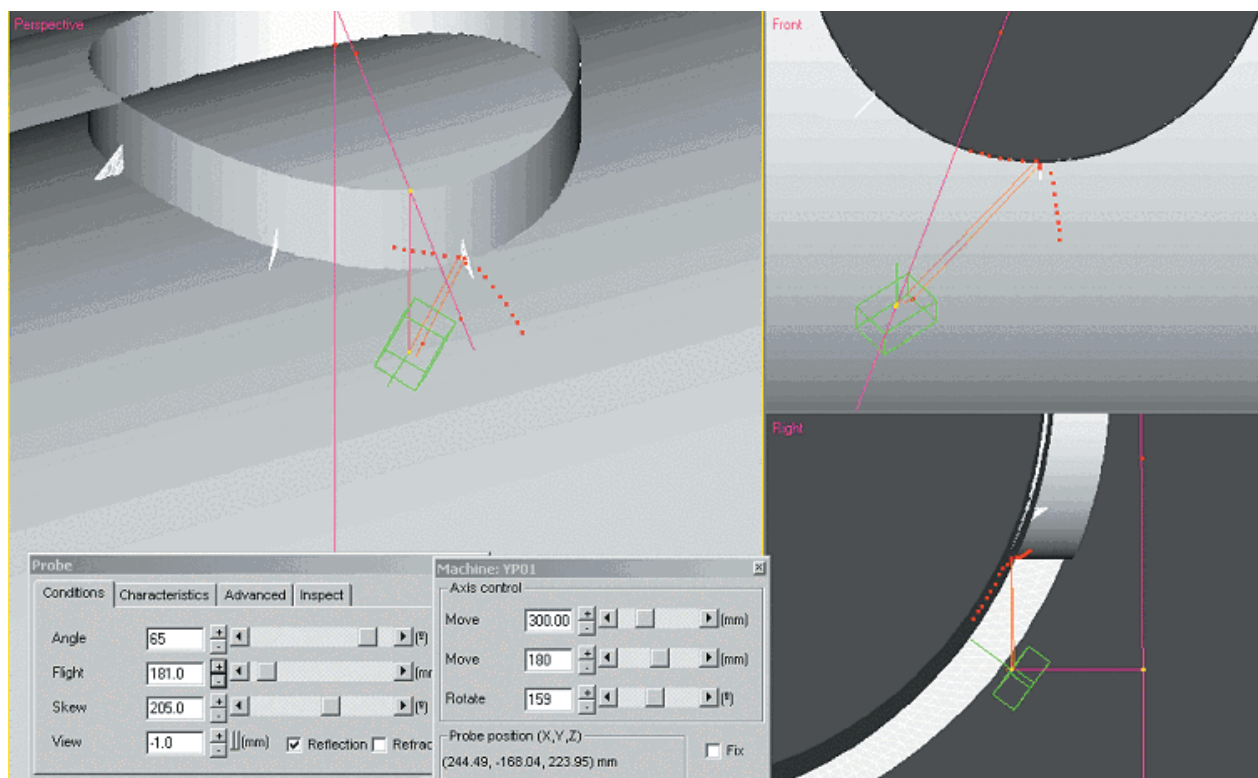
2.2.8 Mekanisoitu tarkastus

Simuloinnin aikana luotainta voidaan liikuttaa samaan tapaan kuin mekanisoidussa tarkastuksessa skannerin avulla. Tuloksesta voidaan jälleen arvioida, miten hyvin äänikeila osuu tarkastettavalle kohdealueelle. Kuvassa 20 on esimerkkinä esitetty kaksi mekanisoidun luotauksen tarkastelua. Tarkastettavasta kehämitasta on luodattu neljännes käyttäen äänikeilan suuntaamisessa heijastajien ”b” ja ”c” luotauksen optimiarvoja.

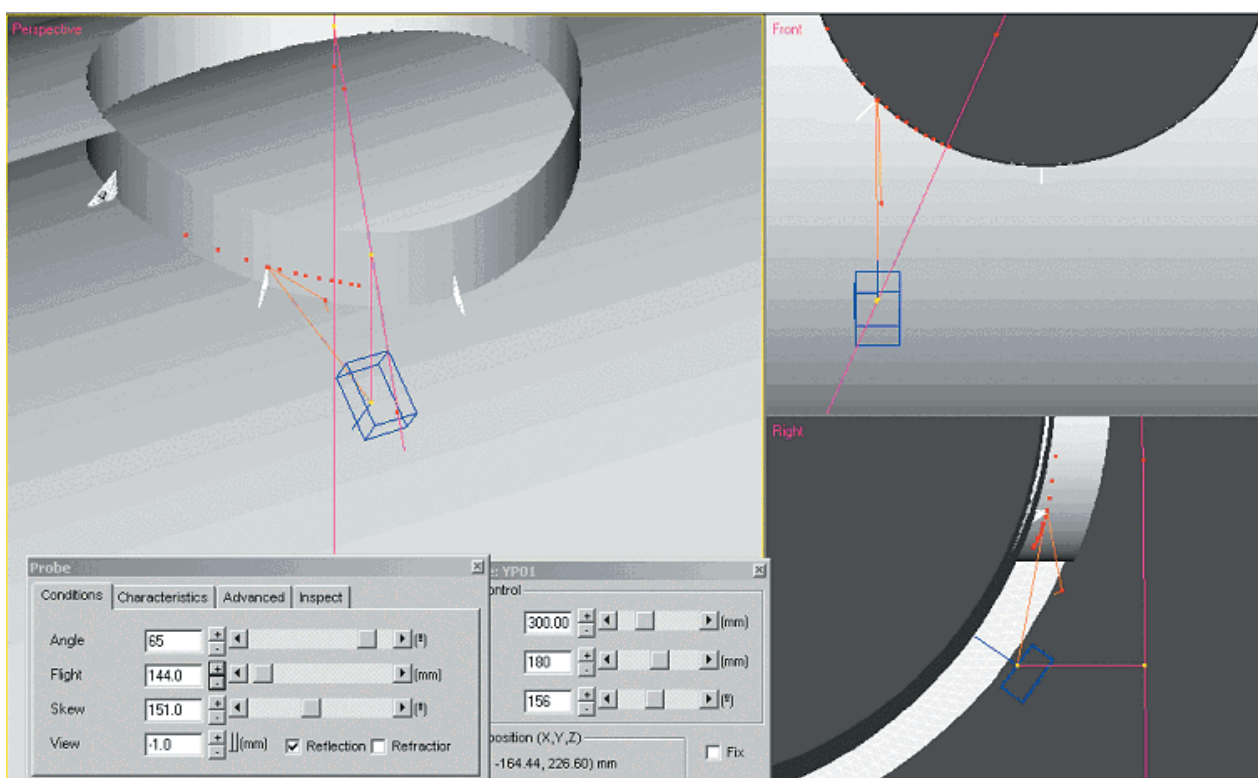
Heijastajan ”b” luotauksen optimiarvoilla (punaiset pisteet, kuva 20) keila osuu hyvin tarkastusalueen nurkkaukseen vain kyseisen heijastajan alueella. Liikuttaessa sekä heijastajaan ”a” että ”c” päin osuma-alue liikkuu kauemmaksi nurkasta ja kohdistuu putken sisäpintaan. Sekä heijastajan ”a” että ”c” kohdalla osuma-alue on jo melko kaukana nurkkauksesta.

Heijastajan ”c” luotauksen optimiarvoilla (vihreät pisteet, kuva 20) osuma-alue liikkuu nurkkauksesta ylöspäin aukon reunaan, kun siirrytään heijastajasta ”c” kohti heijastajaa ”b”. Tämän jälkeen osuma-alue pysyy lähes samalla tasolla aukon reunassa aina heijastajan ”a” alueelle asti.

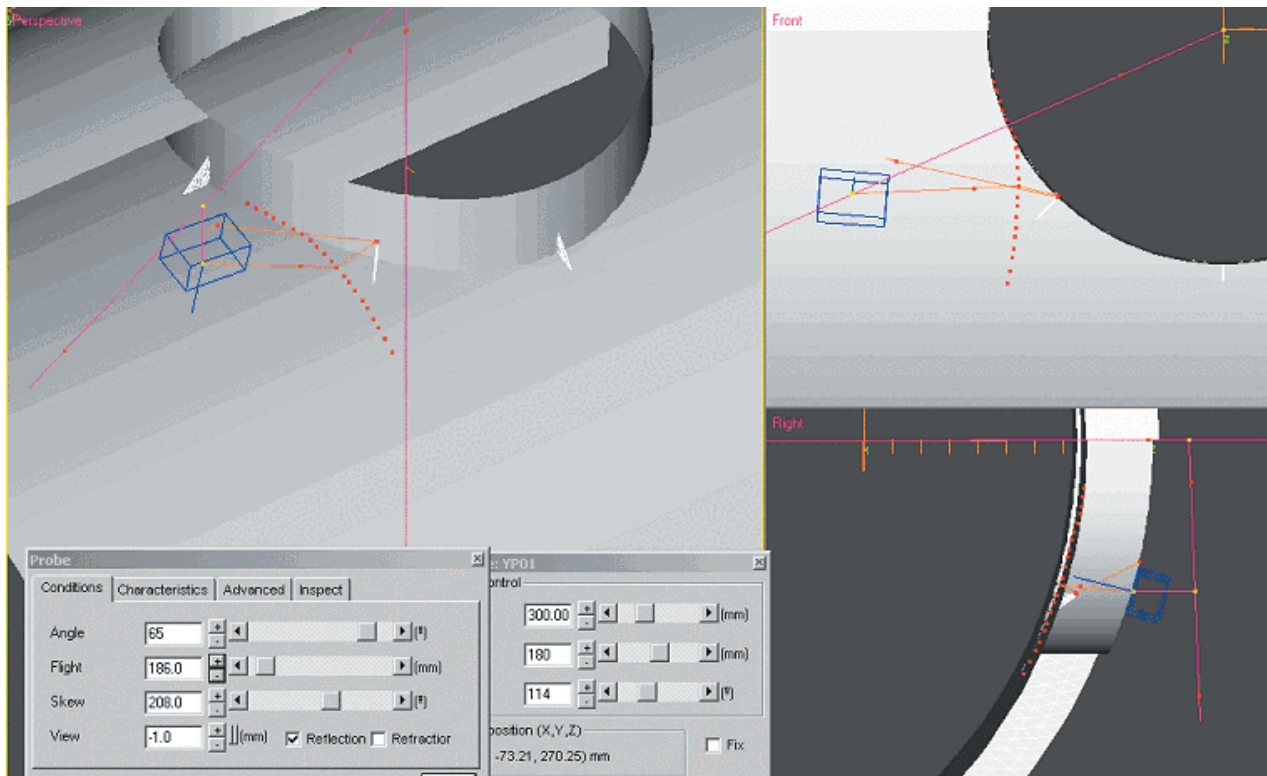
Mekanisoidun tarkastuksen simuloinnit osoittavat hyvin, että äänikeilan suuntaaminen toimii vain hyvin lyhyillä alueilla optimaalisesti, jos käytetään kiinteitä luotauskulmia. Jotta koko sisäpyöristykseen alue tulisi katettua hyvin tarvitaan erilaisten luotauskulmien lisäksi hyvin suunniteltua kääntelykulman ohjausta tai useita luotaukskertoja eri kääntelykulman arvoilla.



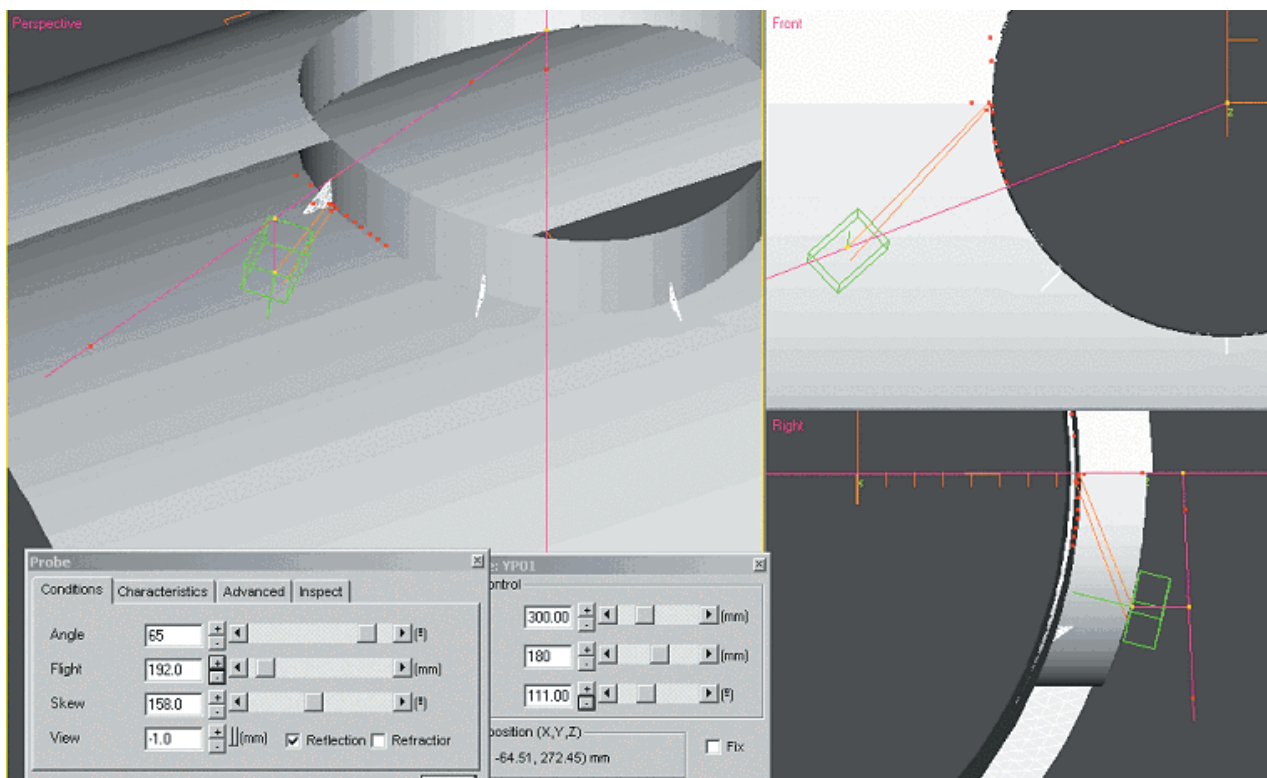
Kuva 16. Heijastajan "a" käsitarkastus 65°:n luotaimella. Luotaimen kääntyessä keila osuu ensin yhdeaukon reunaan, sitten heijastajaan ja lopuksi pääputken sisäpintaan.



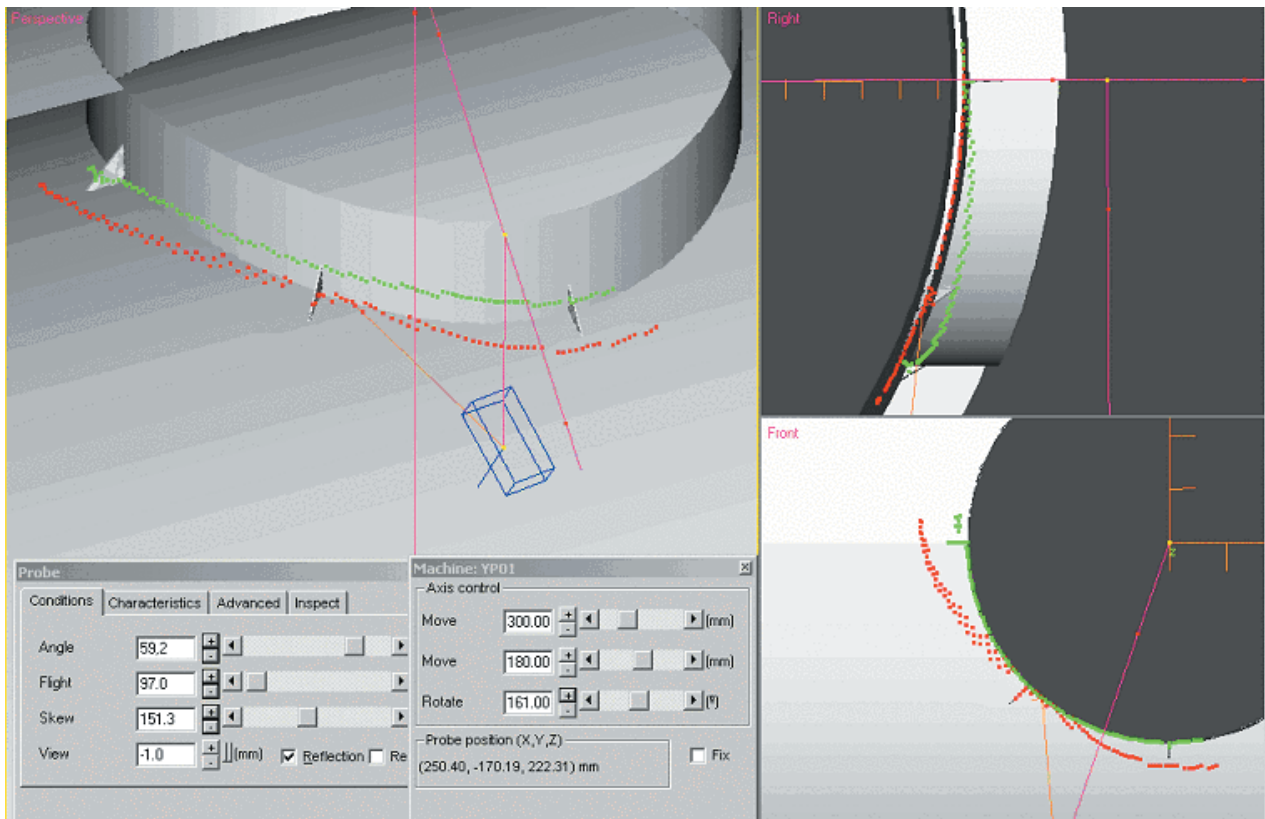
Kuva 17. Heijastajan "b" käsitarkastus 65°:n luotaimella "alapuolelta". Luotaimen kääntyessä keila osuu melko ylös yhdeaukon reunaan ja vain juuri ja juuri heijastajan yläkärkeen.



Kuva 18. Heijastajan "b" käsitarkastus 65°:n luotaimella "yläpuolelta". Luotaimen kääntyessä keila osuu pääputken sisäpintaan, selvästi heijastajan eteen. Hyppäyksen kautta tavoitetaan heijastajan yläkärki.



Kuva 19. Heijastajan "c" käsitarkastus 65°:n luotaimella. Luotaimen kääntyessä keila osuu ensin yhdeaukon ja putken sisäpinnan kulmaukseen ja erittäin tarkasti heijastajan muodostamaan kulmaukseen.



Kuva 20. Simulointi liikuttaen anturia aukon ympäri kääntelykulman pysyessä muuttumattomana. Punaiset pisteet on saatu luotaimella, jonka suuntakulma on $59,2^\circ$ ja kääntelykulma $151,3^\circ$; luotainmäärittely antaa parhaan tuloksen heijastajan "b" luotauksessa. Vihreät pisteet on saatu luotaimella, jonka suuntakulma on $64,5^\circ$ ja kääntelykulma $158,7^\circ$; luotainmäärittely antaa parhaan tuloksen heijastajan "c" luotauksessa.

2.3 Yhteenveto ja päätelmät

Sädemenetelmään perustuvaa ultraäänitarkastuksen simulointia voidaan käyttää luotauksen geometriaan liittyvissä tarkasteluissa esimerkiksi seuraaviin tarkoituksiin:

- Luotauksen suunnitteluvaiheessa voidaan tarkistaa sen perusedellytykset. Nähdään, kuinka hyvin äänikeila saadaan osumaan tarkastusalueelle. Voidaan selvittää, miten hyvin tietyn suuntaisuuden omaava heijastaja heijastaa ääntä takaisin luotainta kohti.
- Voidaan tutkia, miten tarkastettavan komponentin geometria vaikuttaa äänen etenemiseen, ja onko geometrinen muotojen vuoksi odotettavissa erityisiä vaikeuksia tai yllätyksiä.
- Kyetään visualisoimaan luotauksen suoritus. Luotauksen toteuttamista varten voidaan konstruoida erilaisia skannerirakenteita ja simuloida niiden toimintaa.

- Käytettävissä on erilaisia työkaluja, joiden avulla voidaan selvittää luotauksen kattavuus.

Kun tarkastusgeometria on vaikeasti hahmotettava, saattaa sädemenetelmään perustuva yksinkertainen simulointi olla erittäin hyödyllistä tarkastuksen suunnittelu- ja arviointivaiheessa. Simulointi antaa mahdollisuuden tarkastella luotauksen toteutusta kolmiulotteisen mallin avulla ja luotausgeometriaan vaikuttavat tekijät voidaan nähdä havainnollisesti.

Simulointien toteuttaminen sädemenetelmällä on suhteellisen nopeaa ja helppoa, mutta sillä on merkittäviä rajoituksia. Rajoitukset johtuvat suurelta osin siitä, että ultraäänien etenemiseen ja käyttäytymiseen liittyvistä fysikaalisista ilmiöistä vain taittuminen ja peilimäinen heijastuminen Snellin lain mukaan on huomioitu.

3 Esimerkki ultraäänitarkastuksen fysikaalisen käyttäytymisen simuloinnista

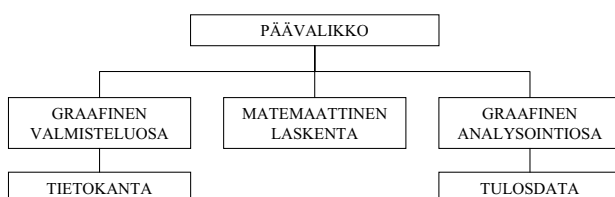
Edellä esitetyissä simuloinneissa huomioitiin ultraäänen käyttäytymisessä vain Snellin laki. Kun fysiikan lainalaisuuksia huomioidaan laajemmin, muuttuu ultraäänitarkastuksen simulointi ja mallinnus huomattavasti monimutkaisemmaksi. Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkien avulla erästä vielä suhteellisen yksikertaista ohjelmistoa, jolla kuitenkin kyetään simuloimaan muutamia keskeisiä ultraäänen fysikaalisia ominaisuuksia.

Simuloinnit tehtiin ”Impulse”-nimisellä ohjelmistolla, jonka on toteuttanut venäläinen yritys (Wave Process Simulation Systems Laboratory). Käytettävissä oli ohjelmiston versio 2.0, joka on toteutettu Dos-käyttöjärjestelmässä.

3.1 Ohjelmiston toiminta

3.1.1 Ohjelmiston yleiset ominaisuudet

Ohjelmisto on tarkoitettu mallintamaan ja simuloimaan ultraäänipulssin syntymistä ja etenemistä erilaisissa materiaaleissa. Edelleen ohjelmalla voidaan tutkia geometrysten muotojen ja materiaalien välisten rajapintojen vaikutusta pulssin käyttäytymiseen. Lähtökohtana on ultraäänen fysikaalisten ominaisuuksien mallintaminen finite difference -menetelmää käyttäen (Alyoshin et al. 1995). Matemaattinen laskenta tehdään numeerisilla menetelmillä. Käytössä ollut ohjelmistoversio käsittelee vain kaksiulotteista simulointitilannetta.



Kuva 21. ”Impulse”-ohjelmiston modulaarinen rakenne.

Ohjelmisto on pyritty suunnittelemaan käytäväksi käytännön luotaustilanteiden simulointiin. Tämän vuoksi siihen on sisällytetty toiminnot, joiden avulla luotauskohteiden geometria, luotaimen ominaisuudet ja luotaustilanne voidaan kuvata interaktiivisten toimintojen avulla suoraan ohjelman ymmärtämään muotoon. Vaikka taustalla on tieteelliseen lähestymistapaan perustuva matemaattinen ydin, on päämääränä ollut insinöörimäiseen työskentelyyn sopiva työkalu.

Ohjelmisto muodostuu kolmesta moduulista, joiden välillä päästään siirtymään päävalikon avulla, kuva 21. Graafisen valmisteluosan avulla kuvataan ja annetaan kaikki lähtötiedot laskentaa varten. Ohjelman ydin on matemaattinen osa, joka suorittaa varsinaisen numeerisen laskentatyön ja tallentaa tulokset tiedostoihin. Laskennan päätyttyä tulostiedostoja tarkastellaan ja havainnollistetaan graafisen analysointiosan avulla.

3.1.2 Luotauskohteen mallinnus

Tarkastuskohteen geometria ja halutut vikaheijastajat muotoillaan ohjelman sisältämien yksinkertaisten piirtötyökalujen avulla. Lähtökohtana on ruudukko, johon kohteen ääriviivat ja eri materiaalien rajapinnat piirretään. Rajaviivoin suljettujen alueiden ominaisuudet määritellään antamalla niille tiheys ja äänen etenemisnopeus. Nämä arvot on tallennettu useimpien tavallisten materiaalien osalta ohjelman sisältämään valmiiseen tietokantaan. Tähän tietokantaan voidaan tarvittaessa tehdä muutoksia ja lisäyksiä. Erilaiset materiaaliominaisuudet havainnollistetaan väreillä tarkastuskohdetta esittävässä kuvassa, kuva 22.

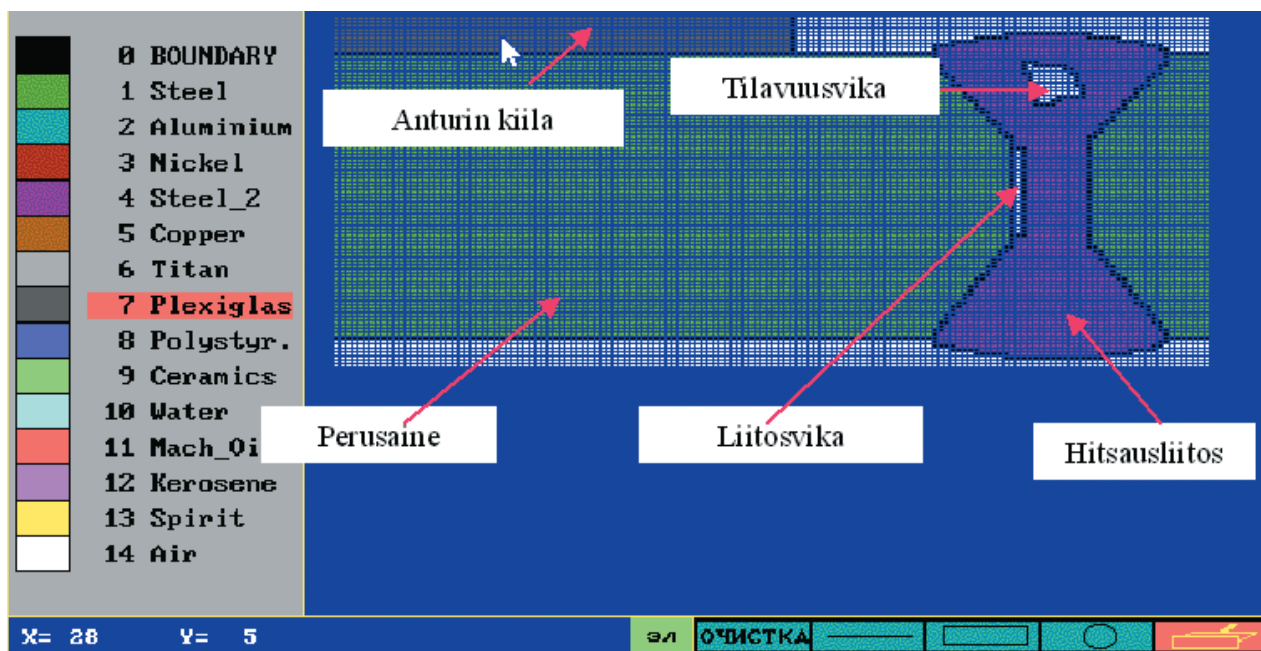
Simulointia varten piirretty ja määritelty luotauskohde tallennetaan tiedostoksi ja on siten aina jälkeensäkin käytettävissä uusia simulointeja tehtäessä.

Nykyisessä ohjelmistoversiossa Dos-käyttöjärjestelmä rajoittaa käytettävissä olevaa muistimäärää, minkä seurauksena simuloitava alue jää melko pieneksi. Esimerkiksi kulmaluotauksen osalta materiaaliipaksuudet, joita kyetään käytännössä simuloimaan ovat enintään noin 10 mm:n luokkaa.

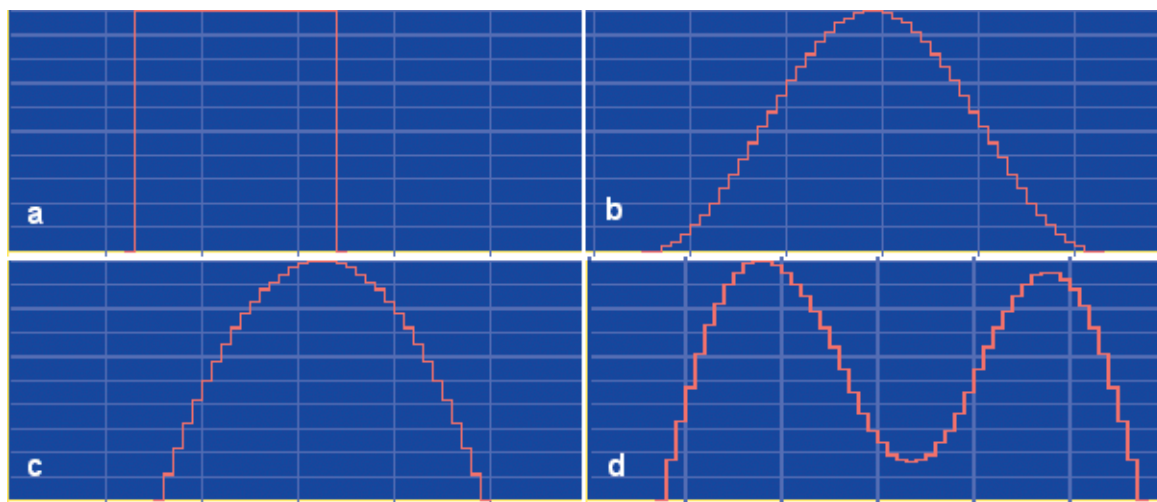
3.1.3 Luotaimen määrittely

Ohjelmistossa ei ole mahdollisuutta suoraan valita tai määrittää tiettytyypistä olemassa olevaa standardiluotainta. Sen sijaan ohjelmassa on keinot, joiden avulla kuvataan simuloitavan anturin

synnyttämä herätepulssi sekä paikan että ajan suhteen. Anturin koko ja sijainti kohteen pinnalla määritetään sijoittamalla halutun pituinen painejakauma anturia vastaavalle kohdalle kappaleen yläpinnalle. Painejakauman muoto määrittää anturin synnyttämän paineen paikallisen vaihtelun anturin alla. Painejakauman muoto on valittavissa kolmesta tarjolla olevasta perusvaihtoehtoista, joita voidaan tarvittaessa muotoilla. Lisäksi painejakauman muoto on piirrettävissä kokonaan itse tai se on koottavissa erilaisten jakaumien summana. Kuvassa 23 on esitetty painejakaumien perusvaihtoehdot.



Kuva 22. Tarkastettavan kohteen geometrian ja materiaalien määrittely simulointia varten. Ruudukkoon on kuvattu levymainen kappale ja siihen hitsi. Perusaineen ja hitsin materiaaliominaisuudet on määritetty erilaisiksi, joten ne näkyvät erivärisinä. Hitsiin on lisätty kaksi vikaa, joiden sisältö on määritetty ilmaksi. Vasemmassa reunassa on näkyvissä osa tietokantaan kuuluvista materiaaleista.



Kuva 23. Anturin painejakauman kuvaamiseen on kolme perusvaihtoehtoa: suorakulmainen (a), Gaussin jakauma (b) ja kellomainen (c). Lisäksi voidaan käyttää vapaata piirtomahdollisuutta tai summata jakaumia toisiinsa mutkikkaampien jakaumien tuottamiseksi (d).

Toisena tehtävänä anturin määrittelyssä on antaa synnytetävän herätepulssin aikariippuvat ominaisuudet. Erillisen valikon kautta päästään määrittelemään pulssin taajuus, amplitudi, kesto ja muoto. Määritysten jälkeen tulos on nähtävissä ohjelman ikkunassa. Kuvassa 24 on esimerkkejä erilaisilla määrittelyillä muodostetuista herätepulssien muodoista ajan suhteen.

Kaikki valinnat ja määrittelyt, jotka on tehty synnytetävän herätepulssin ominaisuuksien kuvaamiseksi, tallennetaan tiedostoina. Tiedostoista muodostuu tietokanta, josta voidaan myös myöhemmin valita käyttöön sopivia valmiiksi tehtyjä määrittelyjä.

3.1.4 Laskenta

Kun kaikki lähtöarvomäärittelyt on saatu valmiiksi ja tallennettu tiedostoiksi, linkitetään nämä tiedostot yhteen laskentaa varten. Lisäksi annetaan simuloinnin kokonaiskesto aika ja muodostettavien pysäytyskuvien lukumäärä.

Kun laskenta on käynnistetty, se etenee eräajan luonteisena eikä käyttäjä pääse enää vaikuttamaan siihen. Laskennan edistymistä voi ainoastaan seurata näyttöön tulostuvien tekstien avulla. Laskenta-aika on tyypillisesti 1–2 minuuttia. Tuloksena syntyy joukko tulostiedostoja, joita voi-

daan tarkastella ja havainnollistaa ohjelmiston graafisen analysointiosan avulla.

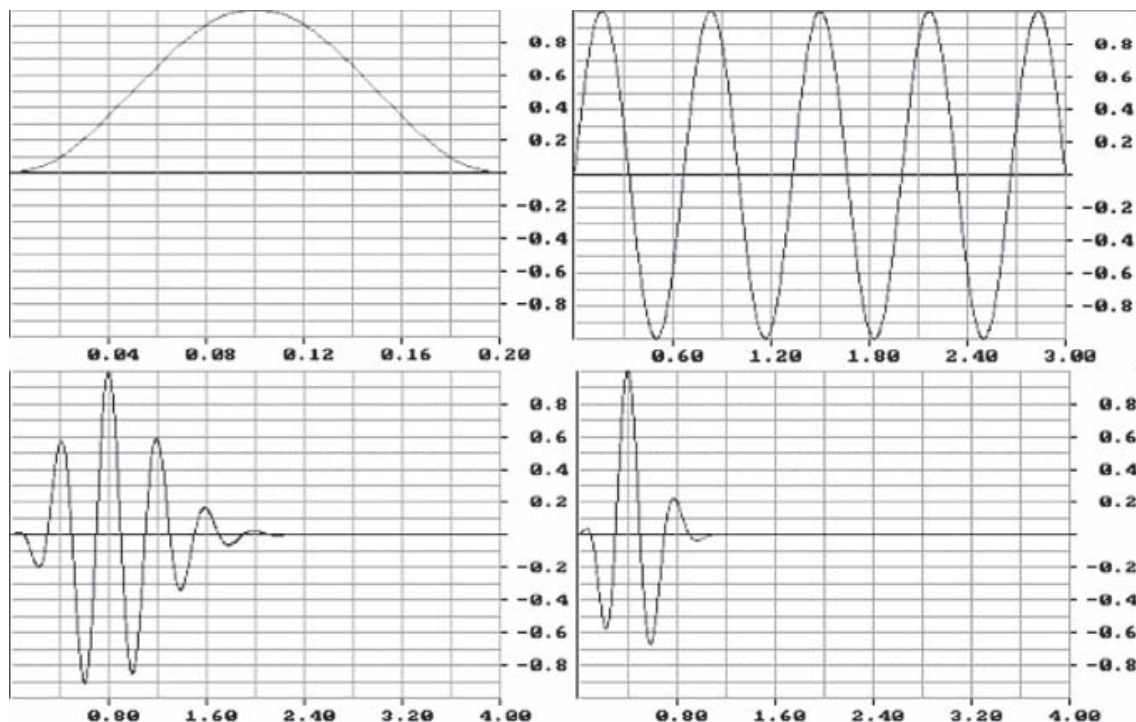
3.1.5 Tulosten havainnollistaminen ja analysointi

Ohjelmiston graafinen analysointiosa sisältää useita mahdollisuuksia tulosten havainnollistamiseksi ja analysoimiseksi. Äänenpaineen jakautumista eri ajan hetkinä tarkastelukohteen sisällä voidaan havainnollistaa pysäytyskuvien avulla. Äänenpaineen jakautuminen koko simuloinnin keston ajalta voidaan saada esiin integroidun kuvauksen avulla. Tämän integroidun kuvauksen kautta kyetään edelleen synnyttämään A-kuvia. A-kuvien muodostamiseen käytetty ”vastaanottimen” pinta määritetään halutun kokoisena ja haluttuun kohtaan integroitua tuloskuvaa. Seuraavassa luvussa esitetyissä simulointiesimerkeissä on nähtävissä erilaisia tuloskuvia, jotka havainnollistavat käytettävissä olevia mahdollisuuksia.

3.2 Simulointiesimerkit

3.2.1 Sivuttaisporauksesta saatavan vasteen simulointi

Simuloidussa kulmaluotauksessa suunnattiin ulträänipulssi 45°:n kulmassa levyäisessä kappaleessa kohti sivuttaisporausta, jonka halkaisija on

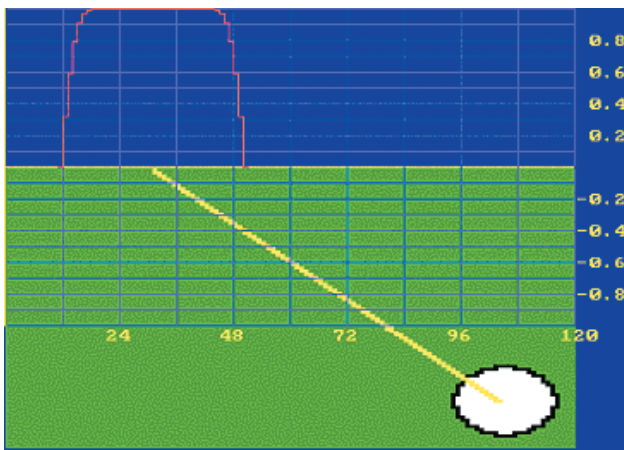


Kuva 24. Eräitä esimerkkejä vaihtoehtoista, joilla anturin tuottamaa herätepulssia voidaan määrittää ajan funktiona. Kuvien vaaka-akselin yksikkö on mikrosekunti.

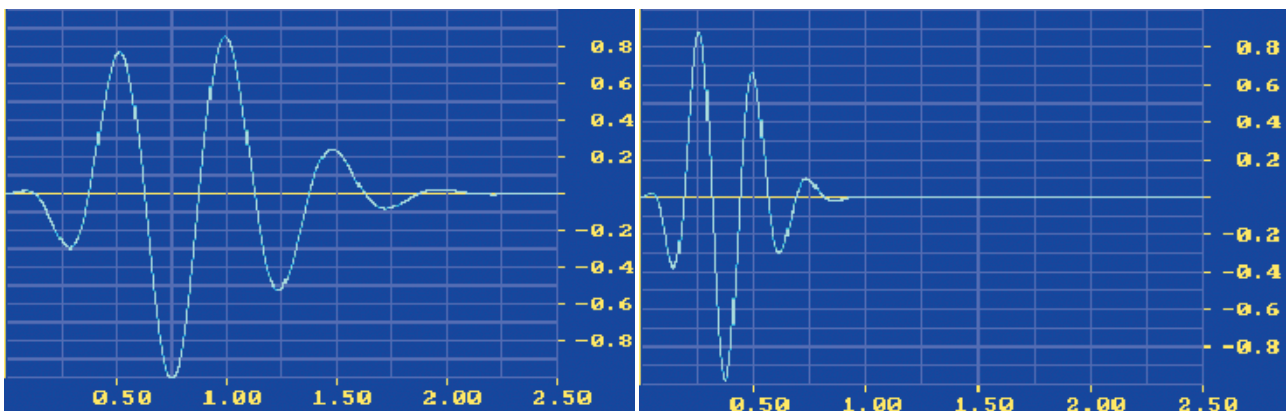
2,5 mm. Sivuttaisporauksen keskipiste sijaitsi 9 mm:n syvyydellä materiaalin pinnasta. Simulointitilanne ja luotaimen painejakauman geometrinen muoto suhteessa heijastajaan on esitetty kuvassa 25. Simulointi tehtiin kahdella luotaimäärityksellä, joiden taajuus ja pulssin kestoajat olivat erilaiset, kuva 26. Toisen anturin taajuus oli 2 MHz ja lähetyspulssin pituus noin 2,2 μ s ja vastaavasti toisen taajuus 4 MHz ja lähetyspulssin pituus noin 0,8 μ s.

Simulointi tehtiin laskemalla ja havainnollistamalla ultraäänipulssin etenemistä kuvaava tilanne yhden mikrosekunnin välein. Näin saadut tilannekuvat, jotka kuvaavat äänenpaineen jakautumista materiaalissa, on koottu kuvaan 27. Kuvissa näkyy selvästi materiaaliin muodostuvien pulssien erilaiset pituudet niiden edetessä samalla nopeudella kohti sivuttaisporausta. Äänipulssin osuessa heijastajaan syntyy heijastus, joka lähtee leviämään rengasmaisina aaltolina.

Ohjelmistolla voidaan edelleen muodostaa ää-



Kuva 25. Sivuttaisporauksen luotaus. Ultraäänilähteen sijainti ja sen geometrinen jakauma on piirretty punaisella. Äänilähteestä heijastajan keskipisteeseen piirretty viiva kuvaa 45°:n luotaussuuntaa.



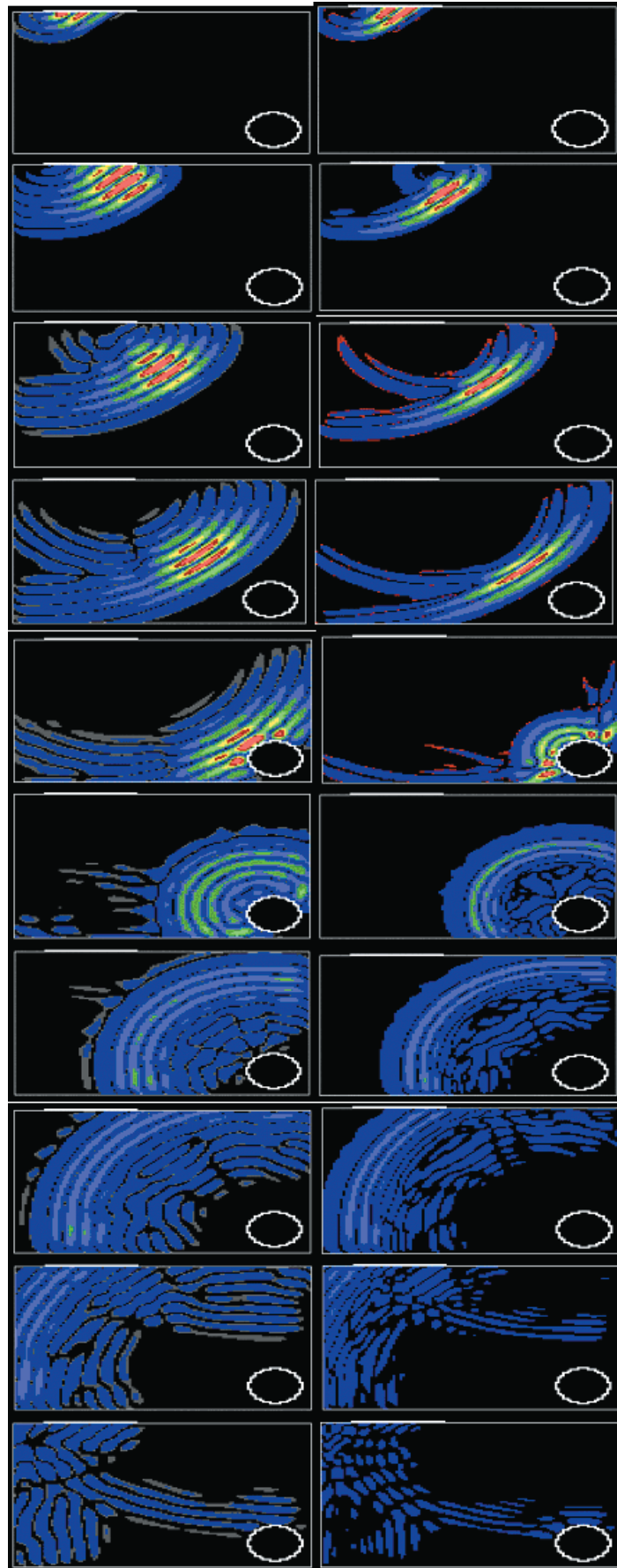
Kuva 26. Vasemmalla simuloinnissa käytetty pitempi pulssi (taajuus 2 MHz ja kesto noin 2,2 μ s), oikealla lyhyt pulssi (taajuus 4 MHz ja kesto noin 0,8 μ s).

nenpaineen integroitu mallinnus koko simuloinnin kestoajalta. Tämän kuvaus pitkän ja lyhyen pulssin osalta muodostuu hyvin samankaltaiseksi kuten kuvasta 28 on nähtävissä. Integroituun äänenpainekuvaan voidaan määritellä vastaanotinpinta, jonka ”mittaamasta” signaalista saadaan muodostettua A-kuva. Kuvaan 28 on merkitty sinisellä palkilla kohteen yläpinnalle vastaanotinalueet, joiden tuottamat A-kuvat on esitetty kuvassa 29. A-kuvissa voidaan nähdä suuriampplitudinen lähtöpulssi ja siitä tietyn ajan kuluttua ”mitattu” porauksesta heijastunutta kaikua kuvaava pulssi. Kuvassa näkyvien pulssien pituudet ovat melko suuria, koska anturia kuvaava mitta-alue on pitkä.

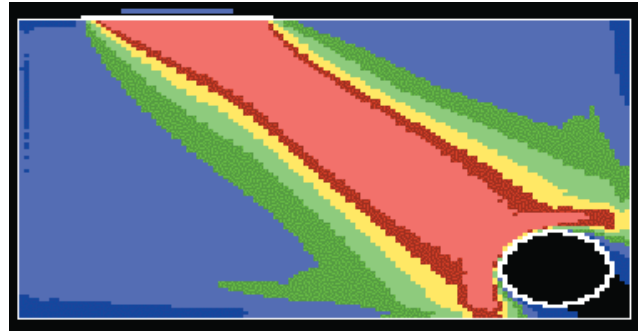
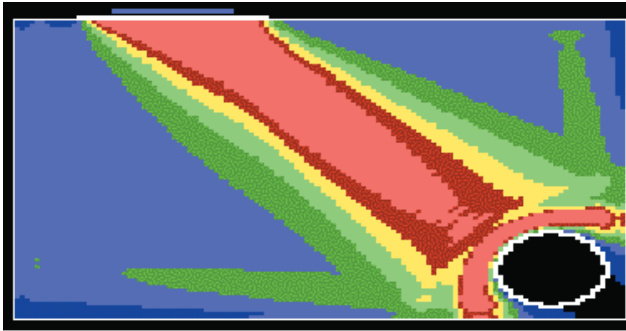
A-kuvista on mahdollista selvittää simuloinnissa toteutuneet pulssien kulkuajat. Tässä tapauksessa kulkuajat määritettiin käyttäen pulssin lähtö- ja saapumishetkinä kuvan 29 pulssien maksimiampplitudien kohtia. Näin saatiin pidemmän pulssin edestakaiseksi kulkuajaksi 7,45 μ s ja vastaavasti lyhyen pulssin kulkuajaksi 7,14 μ s. Simuloinnissa materiaali oli määritelty teräkseksi, jossa äänennopeudeksi oli annettu 3,25 mm/ μ s. Teoreettinen kulku aika kuvitellun luotaimen keskipisteestä sivuttaisporauksen pinnalle ja takaisin on 7,06 μ s.

3.2.2 Kulmaheijastajasta saatavan vasteen simulointi

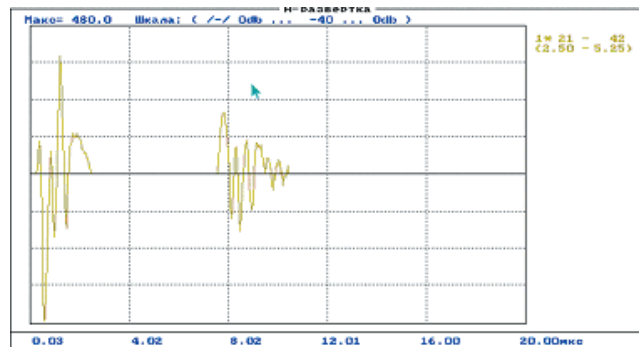
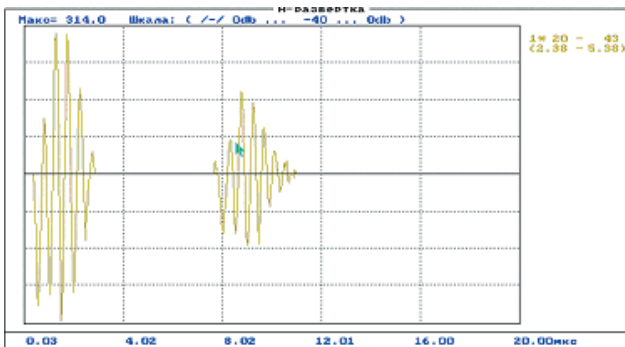
Tässä esimerkissä on simuloitu yksikertaisen kulmaheijastajan luotausta. Heijastaja on kappaleen takapinnalla oleva kapea ura tai särö, jonka korkeus on 2,9 mm. Levymäisen kappaleen paksuus on 9,7 mm. Ultraääni suunnitetaan 45°:n kulma- luotauksella kohti heijastajaa kahdella tavalla. Ensimmäisessä simuloinnissa äänikeilan keski-



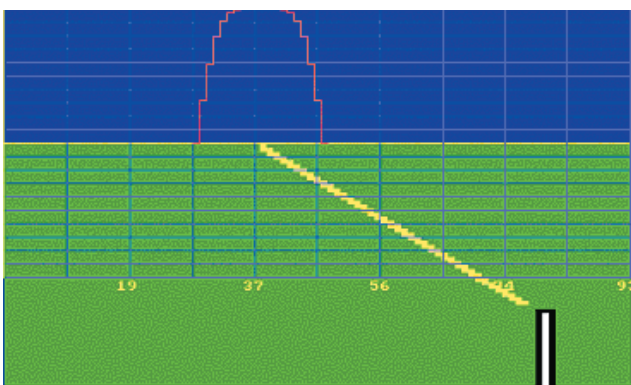
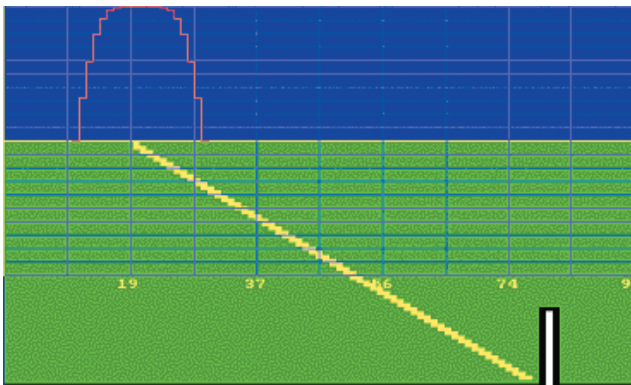
Kuva 27. Ultraäänen heijastuminen sivuttaisporauksesta (Ø 2,5 mm) käyttäen kahta pulssin pituutta (vasemmalla pitkä ja oikealla lyhyt pulssi). Kuvat on muodostettu 1 μ s:n välein.



Kuva 28. Integroidut äänenpaineen kuvaukset simuloitaessa sivuttaisporauksen luotausta. Vasemmalla on käytetty pitkää ja oikealla lyhyttä lähtöpulssia. Kuvitellun vastaanotinanturin sijainti merkitty sinisellä palkilla kohteen yläpinnalle.



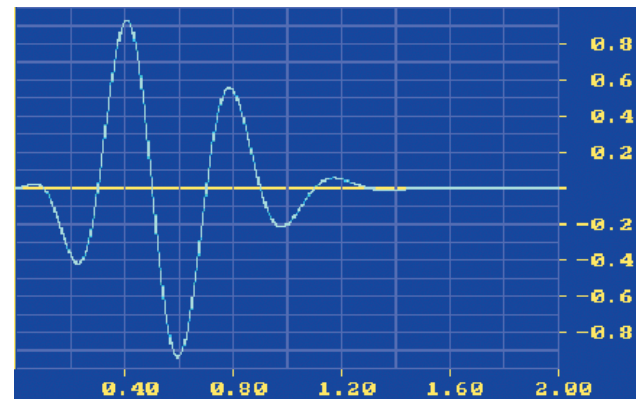
Kuva 29. Simuloinnin tuloksena muodostetut A-kuvat käyttäen anturipintana kuvaan 28 merkittyjä alueita. Vasemmalla pitkän pulssin ja oikealla lyhyen pulssin tuottama A-kuva.



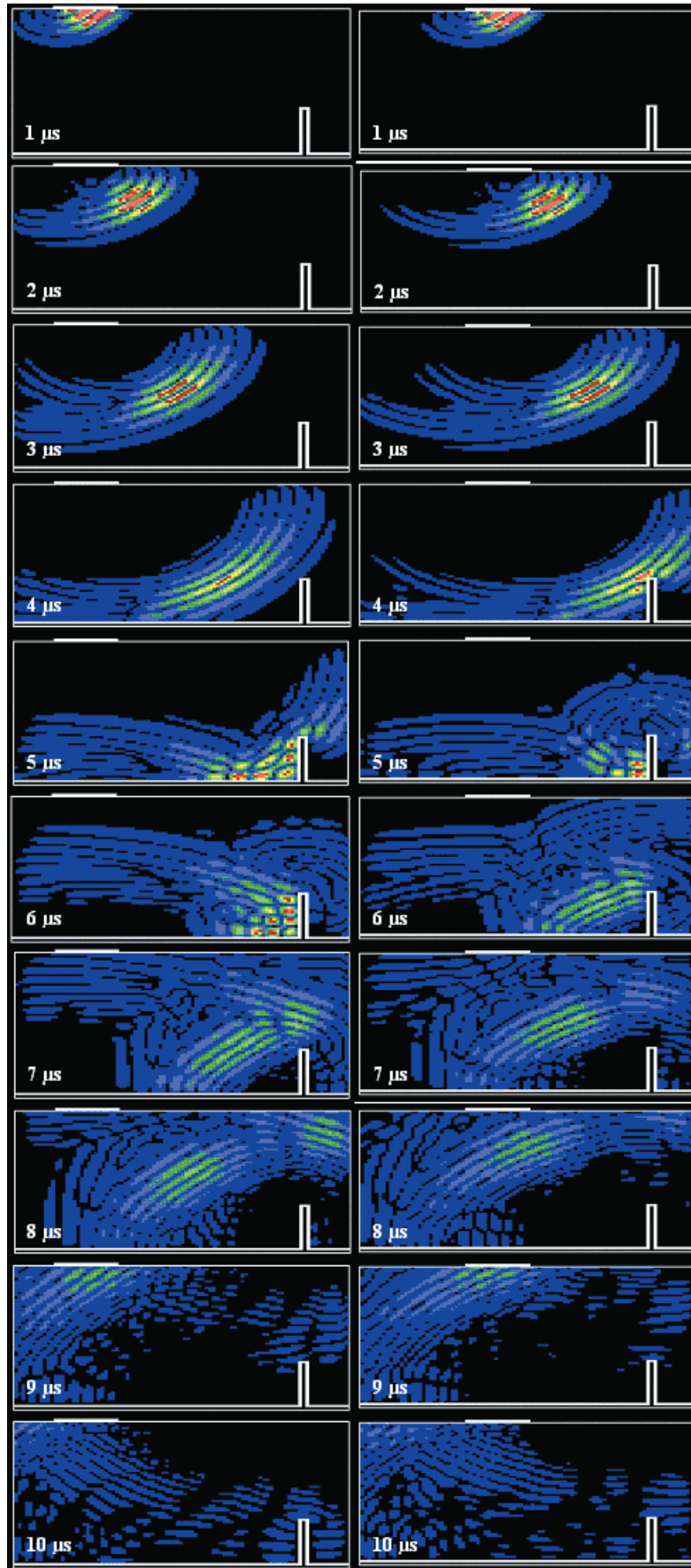
Kuva 30. Herättepulssin geometrinen muoto ja sijainti heijastajaan nähden kahdessa simuloinnissa. Keltainen viiva osoittaa 45°:n suunnan.

linja osuu täsmälleen levyn takapinnan ja heijastajan muodostamaan nurkkaan ja toisessa simuloinnissa keilan keskilinja suuntautuu kohti heijastajan kärkeä, kuva 30. Käytetyn lähtöpulssin taajuus oli 2,5 MHz ja sen muoto on esitetty kuvassa 31.

Simulointi toteutettiin laskemalla ja tulostamalla pysäytyskuvat yhden mikrosekunnin välein. Näin saadut äänenpaineen jakautumista esittävät kuvat on koottu kuvaan 32. Kuvissa



Kuva 31. Simuloinnissa käytetyn lähetinpulssin muoto aikaulottuvuudessa.



Kuva 32. Äänen eteneminen ja heijastuminen levymäisen kappaleen takapinnalla sijaitsevasta urasta. Vasemmanpuoleisessa kuvasarjassa äänikeila kohdistuu heijastajan muodostamaan nurkkaan ja oikeanpuoleisessa sarjassa keila on kohdistettu uran kärkeen.

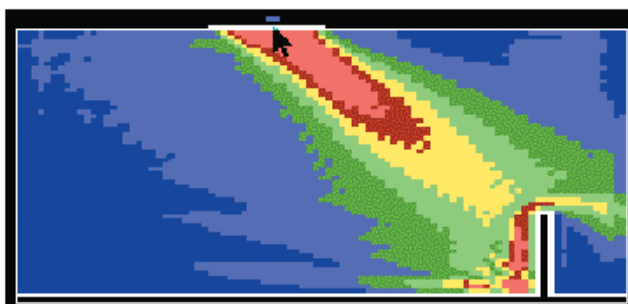
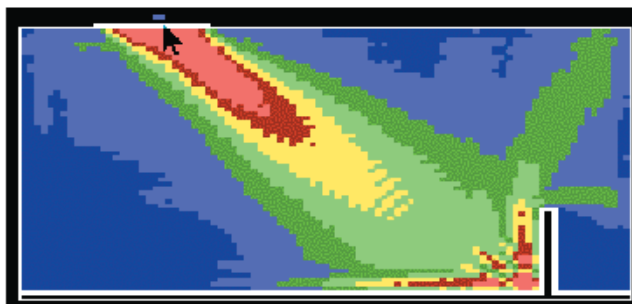
näkyä pulssin eteneminen, käyttäytyminen heijastajan kohdalla ja heijastuneen pulssin kulku takaisin kohti anturipintaa.

Molemmissa kuvasarjoissa nähdään nurkkaheijastuksen muodostuminen. Äänikeilan ollessa kohdistettu heijastajan kärkeen kuljettava matka on lyhyempi ja nurkkaheijastus lähtee palaamaan kohti anturia noin yhtä mikrosekuntia aikaisemmin kuin keilan suuntautuessa kohti nurkkaa. Kummassakin tapauksessa nähdään, että heijastajan kärjen ympärille muodostuu diffraktiokaiku, joka alkaa edetä rengasmaisesti kaikkiin suuntiin kärjen ympäristöön. Diffraktiokaiun muodostuminen näkyy selvimmin oikeanpuoleisessa kuvasarjassa 5 μ s:n kohdalla ja vasemmanpuoleisessa sarjassa 6 μ s:n kohdalla. Kuvista voidaan päätellä, että äänikeilan suuntautuessa heijastajan nurkkaan diffraktiokaiku osuu anturipinnalle noin 8 μ s:n kohdalla ja nurkkaheijastus 9 μ s:n ajanhetkellä. Vastaavasti äänikeilan suuntautuessa kohti heijastajan kärkeä diffraktiokaiku saapuu anturille 6–7 μ s:n kohdalla ja nurkkakaiku 8–9 μ s:n kuluttua simuloinnin alusta. Kuvasarjoista näkyy myös aaltorintama, joka lähtee anturista suoraan alaspäin kohti takaseinää. Tämä aaltorintama heijastuu takaseinästä ja

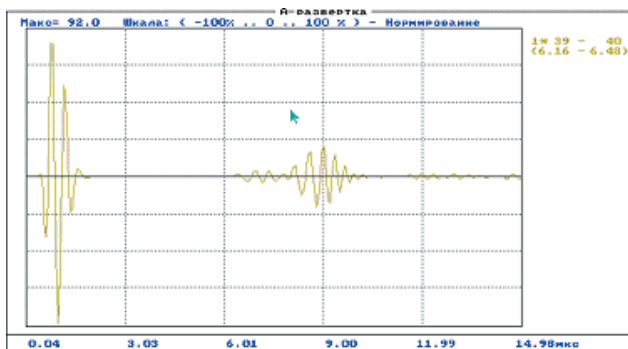
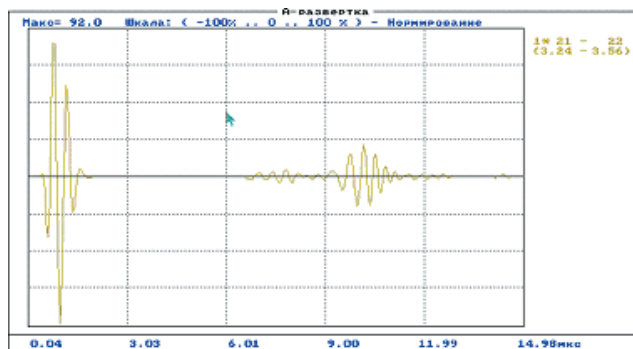
osuu ensimmäisenä anturiin muodostaen samalla ensimmäisen havaittavan kaiun, joka osaltaan peittää ja vaikeuttaa diffraktiokaiun havaitsemista.

Kuvassa 33 on esitetty integroidut äänenpaineen kuvaukset molemmille keilan suuntaamisvaihtoehdolle. Kuvasta voidaan havaita, että äänenpaineen jakautuminen uran kohdalla muuttuu jossain määrin. Kummassakin tapauksessa uran muodostamaan kulmaukseen syntyy voimakkaan paineen alue, joka aiheuttaa nurkkakaiun muodostumisen.

Simuloidun luotauksen tuloksena saadut A-kuvat on esitetty kuvassa 34. Nämä kuvat on muodostettu käyttäen mittausalueena vain anturipinnan keskiosaa, joka on merkitty sinisellä värillä ja nuolella integroidun äänenpaineen kuviin (kuva 33). A-kuvissa on nähtävissä vasemmassa reunassa voimakas lähtöpulssi ja selvästi havaittava nurkkakaiku. Keilan ollessa suunnattu kohti heijastajan nurkkaa on lähtöpulssin ja nurkkakaiun välinen aikaero 8,86 μ s, kun teoreettinen kulkuaika on 8,44 μ s. Vastaavasti äänikeilan ollessa kohdistettu uran kärkeen on A-kuvasta mitattu kulkuaika 7,70 μ s ja teoreettinen kulkuaika 7,29 μ s.

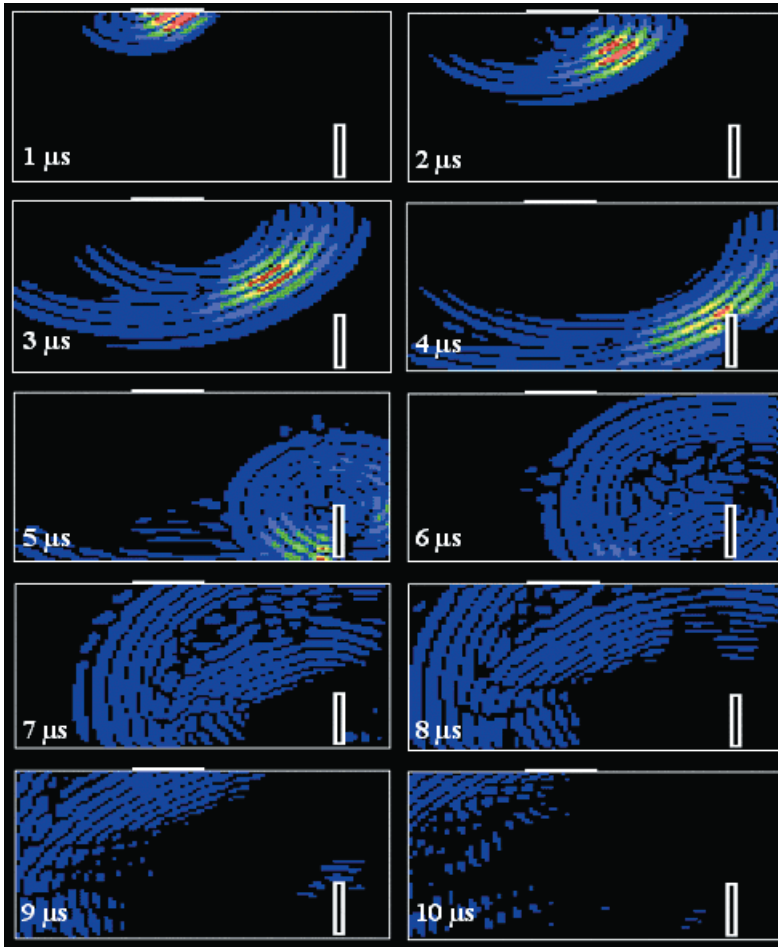


Kuva 33. Integroidun äänenpaineen kuvaukset. Vasemmalla äänikeila on suunnattu kohti heijastajan muodostamaa kulmaa ja oikealla kohti heijastajan kärkeä. Kuvitellun vastaanotinanturin mittausalue on merkitty sinisellä läikällä ja nuolella kuvien yläreunassa.



Kuva 34. Simuloinnin tuloksena muodostetut A-kuvat käyttäen anturipintana kuvaan 33 merkittyjä alueita. Vasemmalla A-kuva keilan suuntautuessa uran muodostamaan kulmaan ja oikealla A-kuva keilan kohdistuessa uran kärkeen.

Molemmissa A-kuvissa on nurkkakaiun edellä nähtävissä pieniamplitudinen kaiku, jossa on nähtävästi toisiinsa summautuneena heijastajan kärjestä lähtenyt diffraktiokaiku ja suoraan kappaleen läpi edestakaisin etenevä pulssi. Tämä kaiku näkyy molemmissa A-kuvissa (kuva 34) samalla kohdalla. A-kuvista mitattu kulkuaika tälle kaiulle on $6,60 \mu\text{s}$ ja vastaavasti teoreettinen kulkuaika suoraan kappaleen läpi edestakaisin on $5,97 \mu\text{s}$.

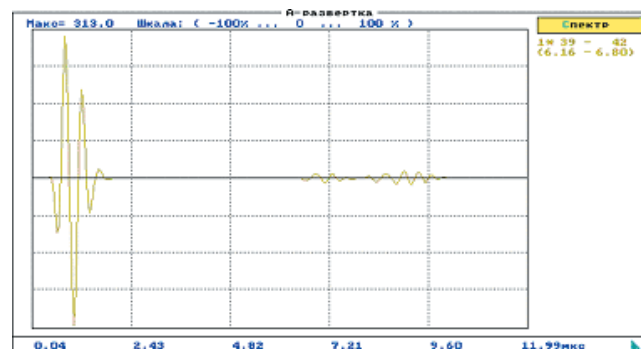
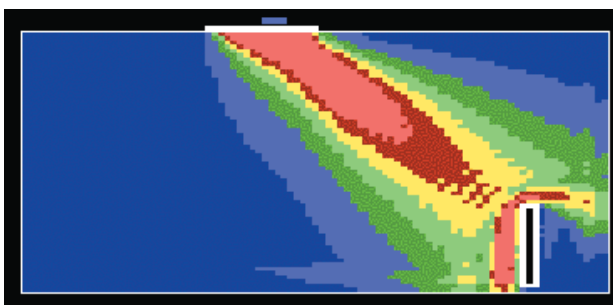


Kuva 35. Kärkikaikujen muodostuminen uraheijastajasta, kun kappaleen takaseinä on poistettu.

Koska kärkikaiun havaitseminen A-kuvista osoittautui edellä esitetyissä simuloinneissa hankalaksi, tehtiin tämän asian tarkastelemiseksi erillinen simulointi. Tässä tapauksessa luotauskohde oli muuten samanlainen kuin edellä, mutta sen takaseinä jätettiin pois. Näin ollen takaseinästä ei saada kaikuja vaan pulssi tavallaan jatkaa kulkuaan sen läpi. Samalla myös nurkkaheijastus jää pois. Tässä simuloinnissa keila oli suunnattu kohti uramaisen heijastajan yläkärkeä

ja tuloksena saadut pysäytyskuvat yhden mikrosekunnin välein on esitetty kuvassa 35. Pulssin osuessa heijastajaan nähdään selvästi ylemmän kärjen ympärille ajanhetkellä $5 \mu\text{s}$ muodostuva diffraktiokaiku, joka lähtee leviämään rengasmaisesti kaikkiin suuntiin. Myös alakärjen kohdalla voidaan havaita rengasmaisesti laajeneva diffraktiokaiku alkaen ajanhetkestä $6 \mu\text{s}$.

Kuvassa 36 on esitetty integroitu äänenpaineen kuvaus ja edelleen sen avulla muodostettu A-kuva. Käytetty mitta-alue on jälleen näkyvässä lyhyenä sinisenä palkkina anturipinnalla. A-kuvassa näkyvä kaiku on amplitudiltaan matala, mikä on tyypillistä diffraktiokaiulle. Siinä on kuitenkin havaittavissa kaksi maksimia, jotka osuvat $5,94 \mu\text{s}$:n ja $8,01 \mu\text{s}$:n etäisyydelle lähtöpulssin maksimista. Teoreettinen kulkuaika anturin keskipisteestä uran yläkärkeen on $5,92 \mu\text{s}$ ja alakärkeen $7,29 \mu\text{s}$.



Kuva 36. Integroitu äänenpaineen kuvaus ja A-kuva simuloinnista, jossa uran alla ei ole heijastavaa seinämää.

3.3 Yhteenveto ja päätelmät

Impulse-ohjelmisto sisältää tarkastuskohteen geometrisen muodon kuvaamiseen kohtalaisen käyttökelpoiset keinot. Piirtotyökalujen avulla voidaan muotoilla ääriviivat ja materiaalien väliset rajapinnat riittävän tarkasti. Materiaalit ovat simuloinnissa ominaisuuksiltaan homogeenisia ja isotrooppisia. Materiaaliominaisuuksien epähomogeenisuutta voidaan kuvata ainoastaan koostamalla alue useista erillisistä alueista tai vyöhykkeistä, joiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan.

Ohjelmiston soveltamismahdollisuuksia rajoittaa simuloitavan alueen pieni koko. Rajoitus aiheutuu Dos-käyttöjärjestelmän muistiavaruuden pienestä koosta. Käytännössä voidaan mallintaa vain pienehköjä tarkastuskohteita. Esimerkiksi 45°:n kulmaluotauksessa materiaalipaksuus voi olla enimmillään vain noin 10 mm.

Äänikeilan mallintamiseen ohjelma sisältää suhteellisen monipuolisia määrittelymahdollisuuksia. Materiaaliin lähetettävän pulssin paikka- ja aikariippuvia tekijöitä voidaan antaa useiden valintojen ja muotoiluparametrien avulla. Käytettävissä ei ole valmiita luotainvaihtoehtoja, joilla esimerkiksi tietty standardianturi voitaisiin kuvata simuloinnissa. Kunkin anturin ominaisuudet on siten mallinnettava muotoilemalla sen materiaaliin synnyttämän pulssin ominaisuuksia.

Tehtävän määrittelyn ja lähtötietojen antami-

sen kannalta on kätevää, että nämä tallennetaan aina tiedostoina. Siten niitä voidaan ottaa helposti käyttöön aina uusia simulointeja tehtäessä ja muodostaa uusia variaatioita pelkästään yhdistelemällä valmiiksi tehtyjä määrittelyjä uudella tavalla.

Simuloinnin tuloksia kyetään havainnollistamaan hyvin pysäytyskuvien avulla. Niissä voidaan nähdä vaiheittain ultraäänipulssin eteneminen materiaalin sisällä ja erilaisten heijastajien sekä rajapintojen synnyttämät vuorovaikutusilmiöt. Käyttäjä voi valita pysäytyskuvien tiheyden, jolloin voidaan vaikuttaa haluttuun tarkkuuteen ja laskenta-aikaan.

Simuloinnista saatavat A-kuvat ovat hyödyllisiä, koska niiden avulla tuloksia voidaan verrata todellisesta mittauksesta saataviin näyttämiin. Samalla ne muodostavat käytännöllisen mahdollisuuden verifioida tuloksia.

Verrattuna nykyaikaisiin sovelluksiin ohjelmiston käyttö on hieman työlästä eikä uusinta grafiikkaa kyetä hyödyntämään vanhentuneen Dos-käyttöjärjestelmän takia. Myös tulosten siirtäminen nykyaikaisiin ohjelmiin, joita yleensä raportoinnissa käytetään, on suhteellisen mutkasta. Sinänsä laskentarutiini, joka on ohjelmiston ydin, on ilmeisesti tehokas, koska laskentaajat vanhalla ja vaatimattoman tehon omaavalla prosessorillakin ovat lyhyitä.

4 Katsaus simulointi- ja mallinnusohjelmien nykytilanteeseen

Tässä luvussa on pyritty selvittämään ja kuvaamaan kehitystä, joka on tapahtunut mallinnus- ja simulointiohjelmistojen alueella Sandlinin (1997) raportin julkaisemisen jälkeen. Aineistona on käytetty materiaalia, joka on kertynyt lehtiartikkelien ja muiden julkaisuiden kautta, kun alan kehitystä on seurattu. Osa tiedoista on saatu tutkimuslaitoksiin suuntautuneiden suorien yhteyksien kautta. Lisäksi siihen on sisällytetty vertailun vuoksi myös kaksi tässä raportissa laajemmin käsiteltyä simulointiohjelmistoa (Midas Ray Tracing ja Impulse).

Tärkeimmiksi katsotut ohjelmistot on käyty läpi kehittelijäryhmittäin. Eri ryhmien mallinnusohjelmia ja nykyvaihetta pyrittiin arvioimaan käyttäen lähtökohtana ENIQ Recommended Practice 6: ”The use of modelling in inspection qualification” -julkaisua (ENIQ 1999) ja sen liitteessä esitettyä kysymyslistaa. Kysymyslistasta muotoiltiin alla esitetty jaottelu ja asialista, jonka kohditiin etsittiin vastauksia aineistoa käsiteltäessä.

Lähestymistapa

- pääasiallinen käyttötarkoitus
- tieteellisyys/käytännöllisyys

Lähtötiedot ja tulokset

- mitä informaatiota ohjelmalle annetaan
- mitä saadaan tulokseksi ja missä muodossa

Fysikaalinen perusta

- huomioitavat fysikaaliset lainalaisuudet

Sovellusalue

- materiaalit, hitsit, austeniittisten hitsien erikoispiirteet
- materiaalin anisotropia ja epähomogeenisuus
- vikaheijastajat
- luotaimen äänikeilan mallinnus
- aaltomuodon muutokset ja diffraktiokaiut

Status

- kehityksen nykyvaihe

Toteutus

- kaksiulotteisuus/kolmiulotteisuus
- laitteisto ja käyttöjärjestelmä
- käyttäjäystävällisyys
- laskenta-ajat
- saatavuus

Toimenpiteet mallin pätevöimiseksi

- kokeelliset
- laskennalliset
- dokumentointi

Käytettävissä ollut kirjallinen materiaali oli eri mallinnusryhmien osalta erilaista ja asiat esitetty hyvin vaihtelevalla tavalla. Tästä johtuen yllä olevan listan eri kohtiin löydettiin vastauksia vaihtelevasti. Lopputulos ei sen vuoksi ole eri mallinnusryhmien osalta kovinkaan yhdenmukainen. Ensisijaisena tarkoituksena oli eri ohjelmistojen osalta löytää käytännön käytettävyyttä koskevia tietoja. Mallien pohjana olevien fysikaalisten lähestymistapojen selvittämiseen ei asetettu suurta painoa. Niitä on osin käsitelty jo Sandlinin (1997) raportissa ja toisaalta yksityiskohtaista tietoa on saatavissa lähteinä mainituista artikkeleista.

4.1 Eri mallintajien status

4.1.1 Commissariat à l'énergie Atomique (CEA)

CEA on tehnyt useiden vuosien ajan kehitystyötä mallinnuksen alalla. Toiminnassa on mukana ainakin julkaisuista päätellen huomattavan kokoinen ryhmä. Useita esimerkkejä työstä on esitetty Sandlinin (1997) raportissa. NDT-mallinnuksen eri alueita on koottu CIVA-ohjelmistopakettiin, joka sisältää myös radiografian ja pyörrevirtatar-

kastuksen mallinnussovellukset. Ultraäänimallinuksen ohjelmisto koostuu tällä hetkellä kahdesta ohjelmasta, jotka ovat edellä mainitun CIVA:n komponentteja. Champ-Sons -ohjelmistolla voidaan mallintaa erilaisten antureiden tuottamaa äänikenttää, joka muodostuu tarkastuskohteen geometriaan. Mephisto-ohjelmistolla mallinetaan puolestaan ultraäänikeilan ja tarkastuskohteen geometrian välistä vuorovaikutusta eli lisätään erilaisten rajapintojen ja vikojen synnyttämät muutokset keilaan.

Ohjelmisto on ollut hyvin esillä viimeaikaisissa konferensseissa ja julkaisuissa, joten siitä on saatavilla runsaasti julkaisumateriaalia.

Lähestymistapa

Ohjelmistokokonaisuus on kehitetty varsin pitkälle, jotta sillä voidaan toteuttaa monipuolisia mallinnus- ja simulointitehtäviä. Se soveltuu luotaimien toiminnan mallintamiseen, tarkastusten suunnitteluun ja erilaisten vaihtoehtojen arvioimiseen luotautulosten analysoinnin yhteydessä. Sen soveltamisesta pätevöinnin yhteydessä on myös esitetty esimerkkejä (Lecoeur-Taibi et al. 2001). Kehitystyön takana näyttää olevan kokonaisuudessaan varsin vankka tieteellinen lähestymistapa, jolla on voitu ottaa huomioon monipuolisesti ultraäänien mallinnukseen liittyvät tekijät, joita on käsitelty esimerkiksi artikkelissa Lhémer et al. (2000). Toisaalta ohjelmistopaketeista on koottu käyttäjäläheisiä versioita tarkastustoimintaa varten. Näitä voidaan käyttää tulosten analysoinnin yhteydessä apuna. Esimerkiksi Intercontrol-yritykselle on tehty räätälöity ohjelmisto, joka on tukena RPA-tarkastusten tulosten tulkinnassa.

Lähtötiedot ja tulokset

Ohjelmistolle annetaan yksityiskohtaiset tiedot luotaimen kuvaamiseksi. Perussovellutukset ovat yksikiteinen, vaiheistettu, kontaktiluotaus tai immersiosovellus. Lisäksi tulee määritellä luotauksen kohteena olevan kohteen geometria, luotaimen sijainti ja vikaheijastajien sijainti. Tarvittaessa geometrinen mallien tuottamiseen voidaan käyttää CAD-ohjelmistoja.

Mallinnuksen tulokseksi saadaan värigrafiikalla toteutettuja kuvia, jotka kuvaavat äänikeilan muotoa ja suuntautumista (äänikeilan mallin-

nus / Champ-Sons). Luotauksen simuloinnista voidaan tuottaa CIVA-ohjelmistopakettien työkalujen avulla A-, B- ja C-kuvia, joissa nähdään syntyvät näyttämät samaan tapaan kuin todellisessa tarkastustuloksessa (kuva 37).

Fysikaalinen perusta

Luotaimen synnyttämän ultraäänikentän ja tarkastuskohteessa olevien heijastajien välisen vuorovaikutuksen laskenta perustuu Kirchhoffin teorialle. Anturin vastaanottama kokonaissignaali saadaan summaamalla heijastajan pinta-alkioiden synnyttämät osakuiot koko heijastuspinnan yli (Lhémer et al. 2000).

Sovellusalue

Ultraääniluotaimen synnyttämän äänikeilan mallinnuksessa kyetään huomioimaan myös anisotrooppinen ja heterogeeninen materiaali eli voidaan mallintaa äänen käyttäytymistä austeniittisessa hitsissä. Keilan ja vian välisen vuorovaikutuksen mallinnuksessa sen sijaan oletetaan materiaali isotrooppiseksi ja homogeeniseksi (Lhémer et al. 2000). Mallia ollaan kuitenkin laajentamassa, jotta voitaisiin huomioida entistä realistisemmin hitsien mikrorakenteen vaikutukset.

Kappaleeseen voidaan sijoittaa erilaisia vikaheijastajia, joiden paikka ja asento on vapaasti määriteltävissä. Ainakin tyypilliset perusgeometrit (tasomaiset heijastajat, sylinterimäiset poraukset) ovat käytettävissä. Ilmeisesti myös monimutkaisempia esimerkiksi CAD-ohjelmilla tehtyjä heijastajamuotoja voidaan viedä malliin.

Tarkastettavan kohteen geometriset muodot ovat huomioitavissa tarkasti. Luotauspinnan epä säännöllisyyksien aiheuttamat muutokset äänikeilan muotoon voidaan mallintaa (Poidevin et al. 2001). Samoin voidaan tarkastella takaseinän muodon (esimerkiksi hitsiviisteen) vaikutusta heijastuvaan keilaan.

Pitkittäiset ja poikittaiset aaltomuodot on huomioitu mallissa samoin ovat mukana aaltomuodonmuutokset ja kärkeikaukujen syntyminen.

Status

Mallin eri ominaisuuksia on tuotu esiin hyvin aktiivisesti NDT-alan eri tilaisuuksissa ja julkaisuissa. Niistä päätellen aktiivisuus kehitystyössä on voimakas ja panostus suuri.

Toteutus

Mallinnus toimii (ainakin Mephiston osalta) kolmiulotteisena mallina. Ohjelmistot toimivat normaalissa PC-ympäristössä. Laskenta-ajat mallilla ovat saadun esittelyn perusteella sekunteja tai korkeintaan minuutteja, joten ohjelmisto sopii ilmeisesti interaktiiviseen työskentelyyn. Ohjelmisto on saatavissa kaupallisena versiona.

Toimenpiteet mallin päteväimiseksi

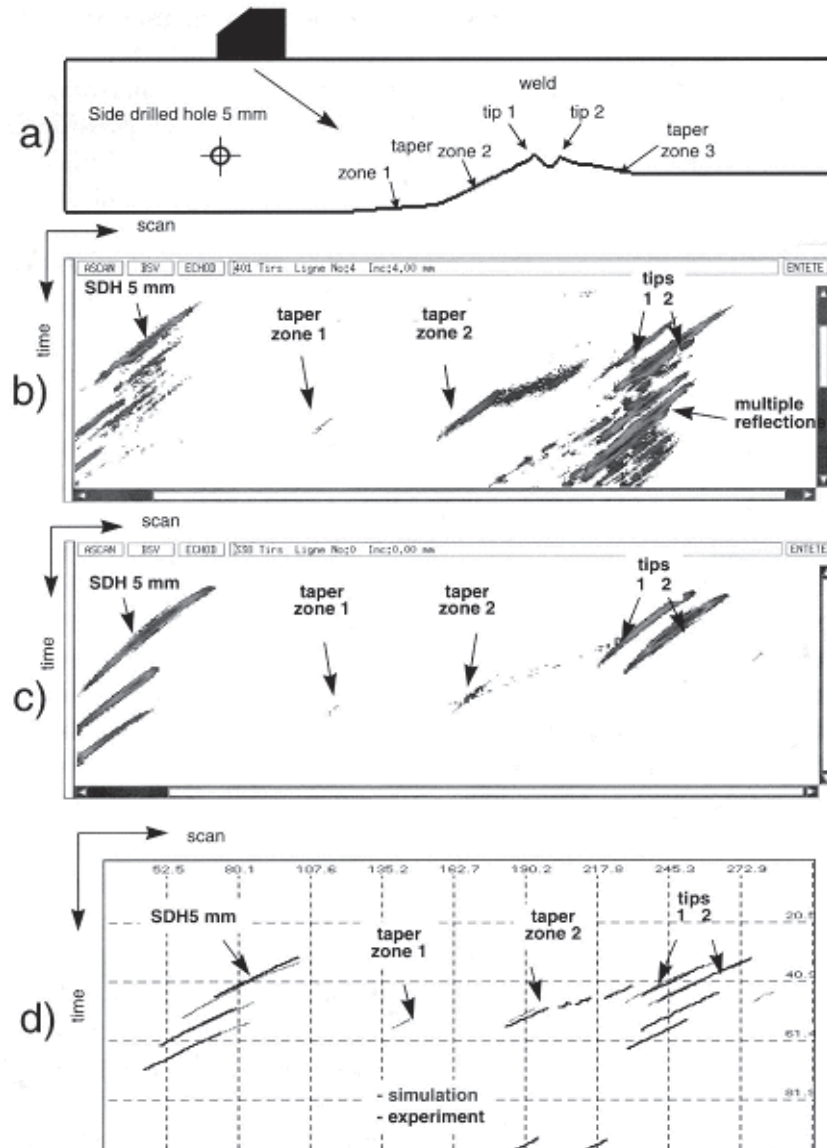
Kokeellisia mittaustuloksia on verrattu mallinnuksen avulla saatuihin tuloksiin. Niistä on esitetty eri julkaisuissa useita tuloksia esimerkiksi Lhémer et al. (2000) ja Poidevin et al. (2001). Myös kuvassa 37 on nähtävissä eräs vertailutulos.

4.1.2 Kasselin yliopisto, Saksa

Kasselin yliopistossa on K. Langenbergin johdolla kehitetty pitkään omaa mallia, joka tunnetaan EFIT-lyhenteellä (Elastodynamic Finite Integration Technique).

Lähestymistapa

Lähtökohdat ovat varsin matemaattiset ja pyrki- myksenä on ymmärtää ja mallintaa ultraäänen käyttäytyminen mahdollisimman hyvin noudatta- en fysikaalisia perusteita. Kaikki nykyään käy- tössä olevat mallinnusalgoritmit perustuvat liki- arvoistus-algoritmeihin, ja sen vuoksi mallinnuk- set eivät vastaa täydellisesti käytännön sovellus- ten mittaustuloksia. Siksi Langenberg pyrkii vält-



Kuva 37. Viisteessä sijaitsevan hitsin tarkastuksen simulointi. Takaseinästä aiheutuvien näyttämien vaikutus tulokseen. a) tarkastuskohteen poikkileikkaus; b) luotauksella saatu todellinen B-kuva; c) simuloitu B-kuva; d) vertailu simuloidun ja mitatun tuloksen välillä (Lhémer et al. 2000).

tämään likiarvoistamisen aiheuttamia virheitä huomioimalla ne fysikaalisissa perusteissa.

Tällä hetkellä mallin laskenta on raskasta muihin ohjelmistoihin verrattuna ja on siksi työllästi sovellettavissa käytännön mallinnustehtäviin. Se sopinee parhaiten hyvin vaativiin ja periaatteellisiin selvitystehtäviin, joiden tutkimiseen voidaan käyttää paljon resursseja. Erityisenä painoalueena mallin kehittämisessä näyttää olevan austeniittisen hitsin vaikutus ultraäänen käyttäytymiseen.

Lähtötiedot ja tulokset

Ohjelmaan annetaan lähtötiedoiksi anturin ominaisuudet, jolloin voidaan mallintaa sen synnyttämä aaltorintaman muoto ja kuvata rintaman etenemistä halutuista vaiheista otettujen pysäytyskuvien avulla. Laskentatuloksista voidaan konstruoida ainakin B-kuvia.

Ohjelmaan voidaan myös kuvata austeniittisen hitsin kiderakenne ainakin kohtalaisella tarkkuudella. Samoin tarkastusgeometriaan voidaan asettaa yksinkertaisia heijastajia.

Tarkempia tietoja erilaisten muuttujien muodosta ja keinoista niiden viemiseksi malliin ei ole kuitenkaan käytettävissä.

Fysikaalinen perusta

Langenbergin malli perustuu elastisten aaltojen perusyhtälöihin kiinteissä aineissa ja näitä yhtälöitä on täydennetty muilla tarvittavilla yhtälöillä kuten Hooken lailla. Erityisesti on huomioitu anturien lähetys ja vastaanottotapahtuma sekä vian käyttäytyminen ultraäänikentän vuorovaikutuksessa. Analyttisen mallin ratkaisu on olemassa vain rajatulle joukolle idealisoituja NDT-kohteita, ja siksi Langenbergin malli perustuu kolmiulotteisten perusyhtälöiden integraalien numeerisiin ratkaisuihin epähomogeenisille materiaaleille, pietsomateriaaleille ja mielivaltaiselle geometrialle. Langenberg väittää, että tämä johtaa yksittäiseen hiladiskretisointiin, jota hän nimittää EFITiksi (Elastodynaaminen äärellinen integrointi tekniikka), jossa materiaali jaetaan riittävän pieniin tilavuusalkioihin, voxeleihin. Tämän diskretisoinnin avulla saadaan ratkaisu, joka johtaa numeeriseen tulokseen vain, jos tietyt stabiilisuusehdot on täytetty. Stabiilisuusehtojen

täyttymättä jääminen voi rajoittaa mallinnuksen soveltuvuutta tiettyihin kohteisiin.

Sovellusalue

Nykyiset mallit toimivat epähomogeenisella ja anisotrooppisella materiaalilla. Siten mallia voidaan periaatteessa käyttää hyvin ultraäänen etenemisen tutkimiseen austeniittisissä hitseissä. Tämä edellyttää kuitenkin hitsin kiderakenteen kuvaamista mallille, mikä näyttää toistaiseksi melko kaavamaisesti toteutetulta (Langenberg et al. 2000).

Luotaimen muodostama äänikeila voidaan mallintaa materiaalissa tarkasti ja havainnollistaa syntyvän äänirintaman muodossa.

Vikaheijastajat, joita mallinnuksesta annetuissa esimerkeissä on käytetty ovat kaavamaisia, esimerkiksi suoraseinäisiä uria.

Malli huomioi erilaiset aaltomuodon muutokset fysikaalisen lähestymistapansa johdosta automaattisesti (Sandlin 1997).

Status

Kehitystyö jatkuu yliopistossa. Erityisesti panostetaan kolmiulotteiseen visualisointiin ja laskentaan. Lisäksi pyritään esimerkiksi realistisempaan austeniittisen hitsin kuvaukseen.

Toteutus

Mallista on olemassa sekä kaksi- että kolmiulotteiset versiot. Kuitenkin esimerkiksi artikkelissa Langenberg et al. (2000) kaikki esimerkkitulokset on tuotettu kaksiulotteisella mallilla. Käytännössä malli nähtävästikään ei ole toistaiseksi riittävän joustava kolmiulotteisiin mallinnustehtäviin.

Ohjelmistoa ei myydä kaupallisesti. Mallinnustehtäviä tehdään kuitenkin yliopiston toimesta ulkopuolisille.

Toimenpiteet mallin päteväimiseksi

Mallilla saatuja tuloksia on verrattu kokeellisiin tuloksiin. Vertailua on tehty esimerkiksi B-kuvia käyttäen. Langenberg et al. (2000) sisältää esimerkkejä tällaisista vertailuista, joissa kohdealueella on ollut austeniittinen hitsi ja yksinkertainen uramainen heijastaja. Artikkelissa mainitaan vertailuissa saavutetun hyviä tuloksia.

4.1.3 Chalmersin teknillinen korkeakoulu, Ruotsi

Lähestymistapa

Ohjelmistolla voidaan simuloida koko tarkastuksen toteutusta käyttäen kontaktiluotaimia joko pulssi-kaiku tai tandem-luotauksessa. Luotaimen ominaisuudet kuten tyyppi, kulma ja koko voidaan määrittellä mielivaltaisesti. Mallinnuksessa voidaan käyttää erityyppisiä vikoja, joiden pinnan ominaisuuksia voidaan säädellä jossain määrin. Erilaiset aaltomuodot ja aaltomuotojen muutokset on huomioitu mallissa.

Ohjelmisto on nykyisellään käytettävissä ikkunoidussa käyttöympäristössä ja se muodostuu erilaisista moduuleista (esikäsittelijä, jälkikäsittelijä ja matemaattinen ydin nimeltään UTDefect). Suoritettavan simuloinnin alkuarvot ja ehdot annetaan esikäsittelijäksi (pre-processor) nimitetyn ohjelmiston avulla. Laskenta tehdään varsinaisen matemaattisen ohjelmisto-osuuden sisältävän ytimen (UTDefect) avulla. Tulokset esitetään lopuksi jälkikäsittelijän (postprocessor) välityksellä. Edellä mainitut ohjelmisto-osat sisältävä kokonaisuus on nimetty SUNDT-ohjelmistoksi.

Lähtötiedot ja tulokset

Tarkastustilannetta koskevat lähtötiedot annetaan esikäsittelijäksi nimitetyn ohjelmiston osuuden avulla. Esikäsittelijän eri ikkunoissa (kuva 38) annetaan tarkastustilanteen yleiset määrittelyt (tarkastusmenetelmä, materiaali, kalibrointi-menetelmä, luotausalue), luotainta koskevat määrittelyt (aaltomuoto, suuntakulma, kiteen muoto,

spektri, fokusointi ja kytkennän määrittely) sekä vikaheijastajan määrittelyt (vian muoto, sijainti, kallistuskulmat).

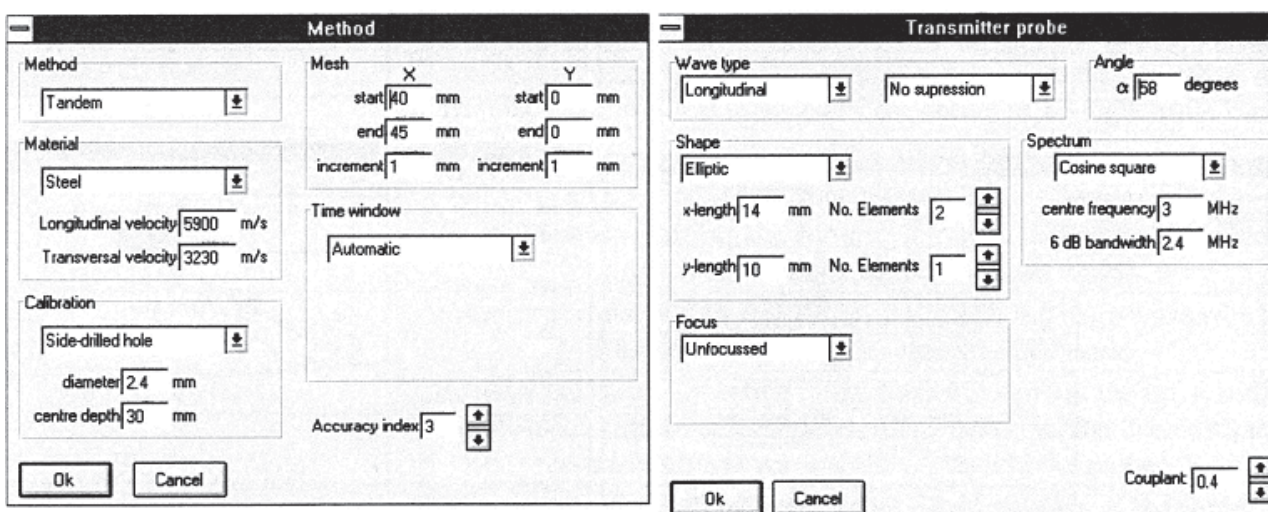
Ohjelmiston laskentaydin (UTDefect) tuottaa tulokseksi binäärimuotoisen tiedoston, jota voidaan tarkastella ja havainnollistaa jälkikäsittelijän avulla. Tulostusikkunaan (kuva 39) voidaan määrittellä erilaisia osia esimerkiksi A-, B- ja C-kuvia. Tulostuksia on mahdollista rajata erilaisten aikaikkunoiden avulla ja määrittellä graafisesti esitettävien kuvien ehtoja (esimerkiksi osoittaa C-kuvassa leikkaus, jonka mukaan B-kuva muodostetaan).

Fysikaalinen perusta

SUND-ohjelmiston laskentaytimenä toimiva UT-Defect ohjelmisto perustuu integraaliyhtälöitä hyödyntävään laskentatekniikkaan (Boström 2000). Integraaliyhtälöt ovat tyypiltään analyttisiä ja materiaali oletetaan lineaarisesti elastiseksi.

Sovellusalue

Tarkastettavan kohteen materiaalin tulee olla homogeenista ja isotrooppista. Tarkastuskohde on ääretön levymainen kappale, jonka paksuus voi olla rajaton tai määritelty. Kappaleen takaseinä on yleensä saman suuntainen kuin luotauspinta, mutta nauhamaisen särön tapauksessa sitä voidaan kallistaa. Antureita voidaan liikuttaa luotauspinnalla suorakulmaista ristikkorataa pitkin. Kappaleeseen voidaan asettaa pallomaisia tai sylinterimäisiä tilavuusvikoja sekä pyöreitä että nauhamaisia säröjä. Pyöreiden säröjen pintojen



Kuva 38. SUND-ohjelmiston käyttöliittymän ikkunoita, joissa määritellään lähtötietoja simulointia varten (Wirdelius 2000).

kontaktiominaisuuksia voidaan säädellä ja simuloida särön kiinnipuristumisen vaikutusta saata-vaan tarkastustulokseen. Mallinnukset avoimelle ja nesteen täyttämälle särölle on sisällytetty optioina. Pyöreää säröä voidaan liikutella ja käännellä vapaasti mallinnuskohteessa.

Ohjelma huomioi erilaiset aaltomuodot ja laskee aaltomuodon muutokset.

Status

Mallin ytimen (UTDefect) kehitystyö jatkuu Chalmersin teknisessä korkeakoulussa ja keväällä 2002 on suunnitelmassa julkaista uusi versio (3.0). SAQ Kontroll AB on tehnyt kehitystyön SKI:n (Swedish Nuclear Power Inspectorate) rahoituksella ohjelmiston muuttamiseksi Windows-pohjaiseksi järjestelmäksi ytimen ympärille (SUNDT). Näin on pyritty lisäämään ohjelmiston käyttäjien määrää. Myös uusi versio koko ohjelmisto pakettista (SUNDT) on odotettavissa ytimen päivityksen valmistumisen jälkeen.

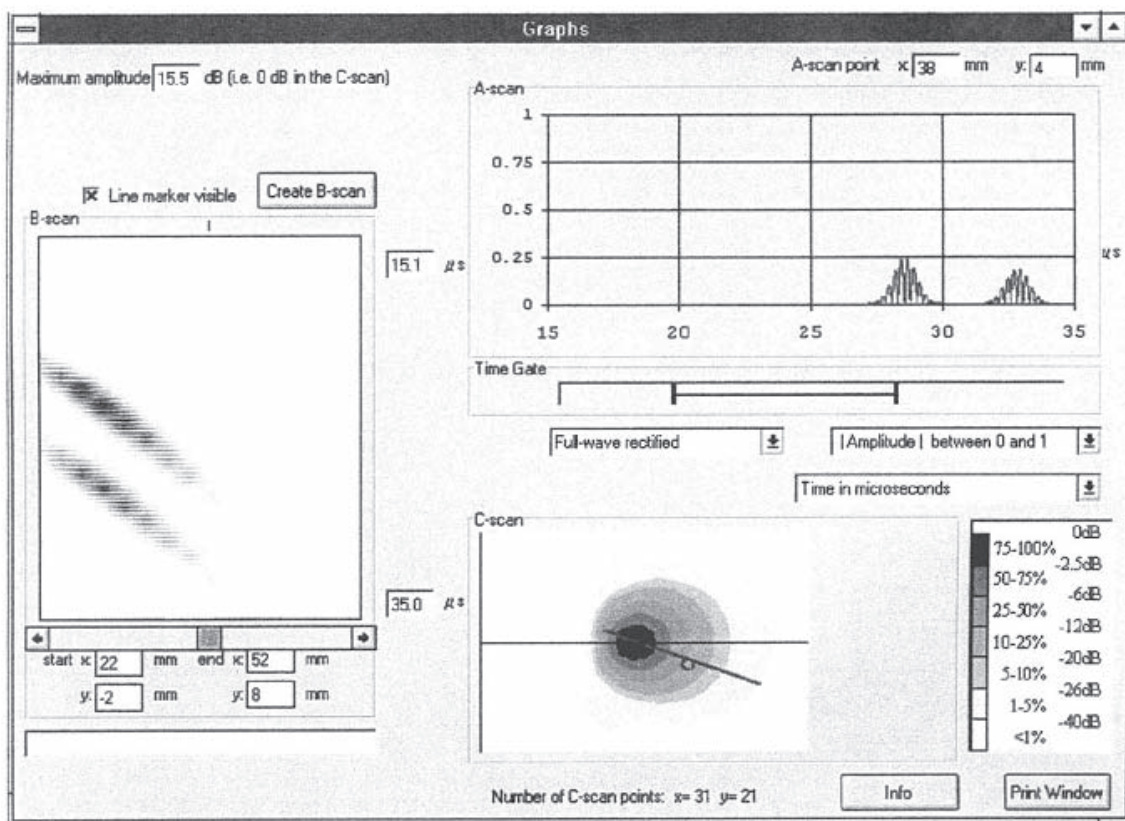
Ruotsissa toimiva päteväntikeskus, Swedish Qualification Center (SQC), on osaltaan rahoittanut ohjelmistopakettien kehittämistä sovellutukseksi, jota se voisi käyttää henkilöpätevöinneissä

(simSUNDT). Tällä ohjelmistolla on tarkoitus korvata sokkokokeita.

Ruotsalaiset ovat tarkastelleet myös anisotrooppisen materiaalin mallintamista (Eriksson et al. 2000). Mallinnuksessa on käytetty kerroksellista materiaalikuvausta, jossa kunkin kerroksen kiderakenteen suuntautuneisuus voidaan määritellä vapaasti. Mallin avulla on tarkasteltu nauhamaisten säröjen tarkastustapausta. Ratkaisuun on otettu mukaan sekä heijastumisen että diffraktion kautta syntyneet kaiut. Huolimatta tehdystä teoreettisesta työstä näyttää siltä, että mallinnuksen tätä osaa ei ole ainakaan toistaiseksi viety käytäntöä lähempänä olevaan ohjelmistopakettiin (SUNDT).

Toteutus

Mallinnus tapahtuu kolmiulotteisessa avaruudessa. Nykyinen ohjelmistokokonaisuus toimii Windows ympäristössä. Käyttöliittymä vaikuttaa niin kehittyneeltä (katso lähtötietojen syöttö ja tulos-tus), että ohjelman käyttö ei-asiantuntijoiltakin onnistuu. Ohjelman ydin laskee alkuarvojen syötämisen jälkeen mallinnustehtävän ja muodostaa tuloksista numeerisen (binäärisen) tiedoston. Tätä



Kuva 39. Esimerkki SUNDT-ohjelmiston tuloksikunasta (Wirdelius 2000).

tulostiedostoa voidaan sen jälkeen tarkastella nähtävästikin interaktiivisesti jälkikäsitteilyavulla. Ohjelmiston kehitystyöstä ja toiminnasta on saatavissa runsaasti tietoa SKI:n julkaisuista (mm. ohjelmiston käyttöoppaat, Boström (2000) ja Wirdelius (2000)).

Toimenpiteet mallin pätevämmiseksi

Mallin avulla saatuja laskennallisia tuloksia on verrattu kokeellisiin tuloksiin. Boström (2000) viittaa useisiin aikaisempiin julkaisuihin, joissa näitä vertailuja on raportoitu. Vertailujen toteutetaan tuottaneen enimmäkseen myönteisiä tuloksia. Vertailuja on kuitenkin tehty vain nauhamaisille säröille käyttäen sivuttaisporausta kalibrointiheijastajana, joten kaikille malliin sisältyville vikatyypeille ei ole tuotettu tämän tyyppistä pätevointiaineistoa.

4.1.4 BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung), Saksa

FSAM (Fast Semi Analytical Model)

Lähestymistapa

Ohjelmistoa on kehitetty työkaluksi, jonka avulla voidaan parantaa ja varmentaa ultraäänitarkastuksen tulosten tulkintaa. Laskentamalli on pyritty yksinkertaistamaan, jotta se olisi riittävän nopea ja joustava analysoitaessa käytännön tarkastuksista saatavia tuloksia. Toisaalta laskentamallissa on huomioitu ultraäänitekniikan fysiikaalisia tekijöitä luotaimen ominaisuuksien, kohteen geometrian sekä vikaheijastajan ominaisuuksien kannalta. Ohjelmiston avulla kyetään muodostamaan tulostuloksia, joita voidaan käyttää referensseinä päätettäessä todellisten näyttämien muodostumistapaa ja -syitä.

Lähtötiedot ja tulokset

Mallinnusta varten annetaan käytettävän luotaimen tiedot (värähtelijän koko, kiilan muoto ja mitat ja taajuusspektri). Samoin tarkastuskohteen ja vikaheijastajien geometria pystytään kuvaamaan malliin pikkutarkasti. Näin ollen vikaheijastajien muoto, koko ja sijainti voidaan määritellä. Samoin kyetään kuvaamaan kohdealueella sijaitsevan hitsin juurikuvun korkeus ja leveys.

Aikaisemmassa artikkelissa mainitaan, että kohteen geometriset muodot on rajattu suorakul-

maisiin tai kiilamaisiin kappaleisiin, jotka muodostuvat tasopinnoista tai saman keskeisistä kaarevista pinnoista muodostuviin kappaleisiin (Wüstenberg 1997). Uudemmassa artikkelissa (Wüstenberg et al. 2000) on esimerkeissä käytetty levymäisiä ja putkimaisia kappaleita.

Tulokseksi saadaan A-, B-, ja C-kuvia, jotka vastaavat esitystavaltaan mekanisoidun luotauksen tuloksia. Näyttämien kaikukorkeustasot esitetään B- ja C-kuvissa erilaisilla väreillä koodattuna.

Fysikaalinen perusta

Ultraäänianturin tilavuuteen lähettämä äänikenttä lasketaan pistevaikutuksen avulla. Kokonaiskenttä saadaan lasketuksi koko lähettävän pinnan pisteiden summana. Mielivaltaisen anturin mallintaminen on mahdollista. Jotta ultraääniaallon vuorovaikutus vian kanssa voidaan täysin arvioida, täytyy koko äänitie lähettimestä vikaan ja takaisin tarkastella. Geometriset olosuhteet simulointitilanteessa kuvaillaan kolmiulotteisesti. Äänen etenemisilmiöiden oletetaan tapahtuvan vetojännityksettömässä väliaineessa. Elastiset ominaisuudet huomioidaan heijastuksessa, taittumisessa ja taipumisessa. Lisäoletuksia tehdään sekä anturin värähtelijän että vian pinnalla tapahtuville aaltomuodon muutoksille. Homogeenisessä ja isotrooppisessa materiaalisissa ei ole muita heijastavia kohtia kuin vika ja takaseinä. Vian kuvaamisessa on yhdistetty elastodynaaminen pistevaikutus ja dipolisuunta-vaikutus.

Tätä puolianalyttisestä mallia, ei voi johtaa suoraan suljetun analyttisen kaavan avulla. Mallin rakentamisvaiheessa fysikaalisten ilmiöiden kuvaamiseen käytetään likiarvoistuskäyviä. Näin turhat mekanismit on karsittu ja päästään kaikki relevantit akustiset vuorovaikutukset huomioimaan malliin. Samalla laskenta-ajassa säästetään. Kuvassa 40 on esitetty BAM:n mallin periaate. Kaikukorkeus lasketaan tulona, jossa ovat tekijöinä luotaimen synnyttämä äänikeila, vian heijastama äänikenttä sekä luotaimen ja vian välinen etäisyys. Mallissa huomioidaan aaltomuodon muutokset ja kaiken kaikkiaan malli tarkastelee 14:ta erilaista fysikaalista vuorovaikutusilmiötä, jotka muodostuvat eri etenemisreitien ja aaltomuotojen yhdistelminä (Wüstenberg et al. 2000)

Sovellusalue

Mallia voidaan soveltaa perusgeometrialtaan melko yksinkertaisille kohteille (esimerkiksi levyt ja putket). Toisaalta pienipiirteisiä yksityiskohtia kuten hitsin juurikupu voidaan ottaa huomioon mallissa. Vikaheijastajan geometrisina muotoina ovat käytettävissä suorakulmainen ja elliptinen heijastaja, tasapohja- ja sylinteriporaus sekä ura, jota voidaan kallistella.

Materiaalin anisotropiaa tai epähomogeenisuutta ei mallissa kyetä huomioimaan. Sen sijaan eri aaltomuodot, aaltomuodonmuutokset samoin kuin anturin taajuusspektri ovat mallinnuksessa vaikuttavia tekijöitä.

Mallin kehityksessä on ollut ajatuksena, että sitä voitaisiin käyttää työkaluna tehtäessä ultraäänitarkastuksessa saatavien tulosten analysointia. Sen avulla pyritään löytämään selitykset eri ääniteiden kautta syntyneille näytämille ja erottelemaan muoto- ja vikakaiut.

Status

Viimeisimmän mallin kehitystyö on ollut käynnissä vuodesta 1995 lähtien ja jatkuu aktiivisena. Työ on henkilöitynyt selvästi ultraäänialan tunnettuun uranuurtajaan H. Wüstenbergiin. Hän on kuitenkin jäänyt eläkkeelle vuoden 2001 lopulla.

Työn jatkamisesta on vastuussa marraskuussa 2001 perustettu mallinnuksen projektiryhmä, joka toimii prof. Erhardin alaisuudessa.

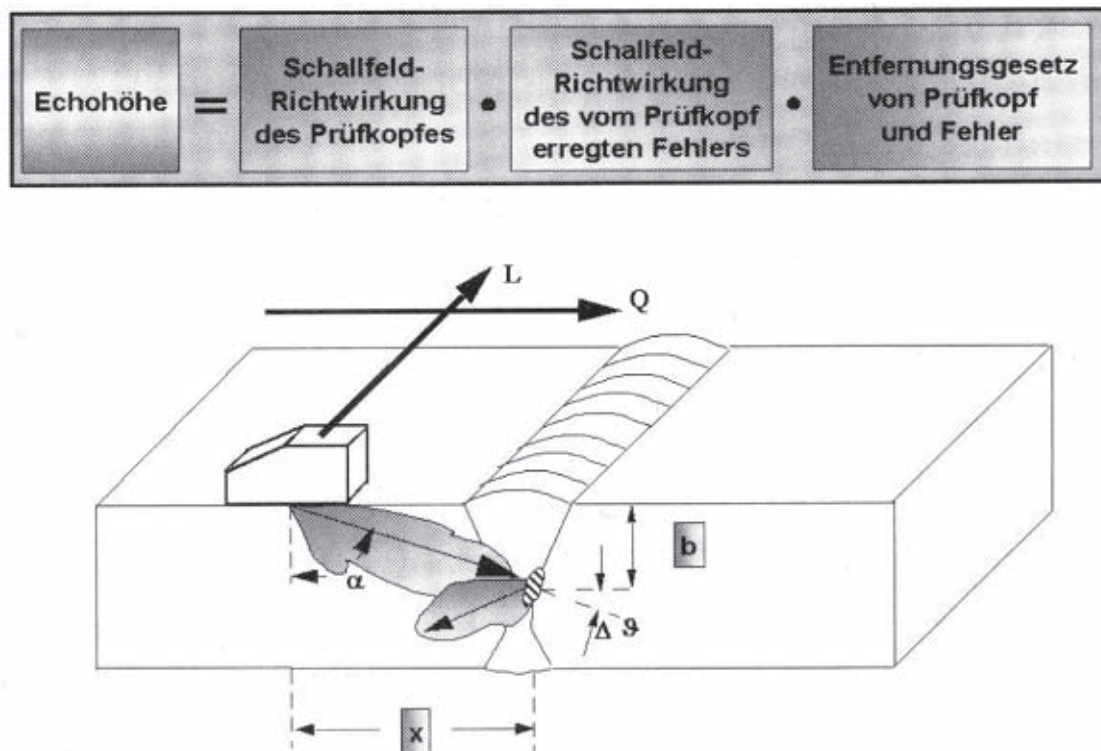
Toteutus

Mallinnus tehdään kolmiulotteisessa avaruudessa ja se toimii PC-ympäristössä. Esimerkkinä laskenta-ajosta mainitaan, että 50:stä A-kuvasta muodostuvan B-kuvan laskemiseen kuluu aikaa kahdesta viiteen minuuttiin riippuen käytettävän PC:n suorituskyvystä, kun mallinnustehtävään sisältyy kolme erillistä heijastajaa hitsin juurialueella.

Mallinnusohjelma on BAM:n omassa käytössä eikä sitä ole myyty muille. Ohjelmistolla tehdään tilauksesta mallinnuksia ulkopuolisille.

Toimenpiteet mallin pätevoimiseksi

Mallia on pätevoity vertaamalla mallinnustuloksia kokeellisiin tuloksiin. Käytettäessä testiheijastajina tasapohja- ja sylinteriporasta sekä uraa päädyttiin vertailussa alle 3,5 dB:n eroihin kaiku- korkeuden osalta. Samoin todetaan eri heijastusreittien kautta syntyneiden näytämien ja niiden paikkojen olevan varsin tarkasti yhtäläisiä (Wüstenberg et al. 2000).



Kuva 40. Approksimatiivisen mallin toimintaperiaate (Wüstenberg et al. 2000).

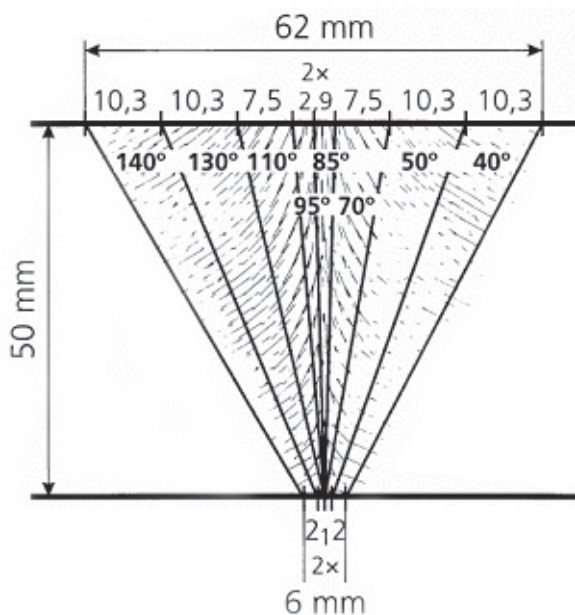
4.1.5 IZFP (Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren), Saksa

IZFP on kehittänyt ultraäänitarkastuksen mallinnusta usealla lähestymistavalla. Mallit keskittyvät suurelta osin mallintamaan ultraäänien etenemistä epähomogeenisissa ja anisotrooppisissa materiaaleissa. Austeniittisten hitsien tarkastukseen liittyvät ongelmat ovat olleet siten yksi keskeisimmistä kohteista tällä tutkimusalueella. Kolmesta kehitetystä mallinnustavasta on tässä yhteydessä Spiesin kehittämät kaksi mallia (GB ja GPSS) käsitelty omana ryhmänä ja sädemenetelmään perustuva malli näistä erillään.

GPSS (Generalised Point Source Synthesis) ja GB (Gaussian beam) -mallit

Lähestymistapa

Lähtökohtana on ollut sopivien laskentamenetelmien löytäminen, joilla voidaan mallintaa ultraäänien käyttäytymistä anisotrooppisissa ja epähomogeenisissa materiaaleissa. Mallien kehittämisessä on valittu teoreettiset lähestymistavat, jotka johtaisivat kohtuullisiin laskenta-aikoihin ja olisivat siten helpommin hyödynnettävissä käytännön sovelluksissa. Julkaistuissa artikkeleissa malleja on sovellettu kerroksellisten kuitulujitteiden materiaalien ja austeniittisten hitsien ultraääniluotauksen tarkasteluun (Spies 2000 a, Spies 2000 b, Spies 2000 c, Spies et al. 1999)



Kuva 41. Epähomogeenisen austeniittisen V-railohitsin jako useaan kerrokseen, joille kullekin on annettu vallitseva kiteiden suuntaisuus asteina verrattuna hitsin pintaan (Spies 2000 a).

Lähtötiedot ja tulokset

Luotaimen ominaisuudet voidaan nähtävästi kuvata hyvinkin yksityiskohtaisesti antamalla erilaisia parametreja laskentaohjelmalle. Näiden tietojen avulla ohjelma pystyy laskemaan syntyvän äänikeilan muodon.

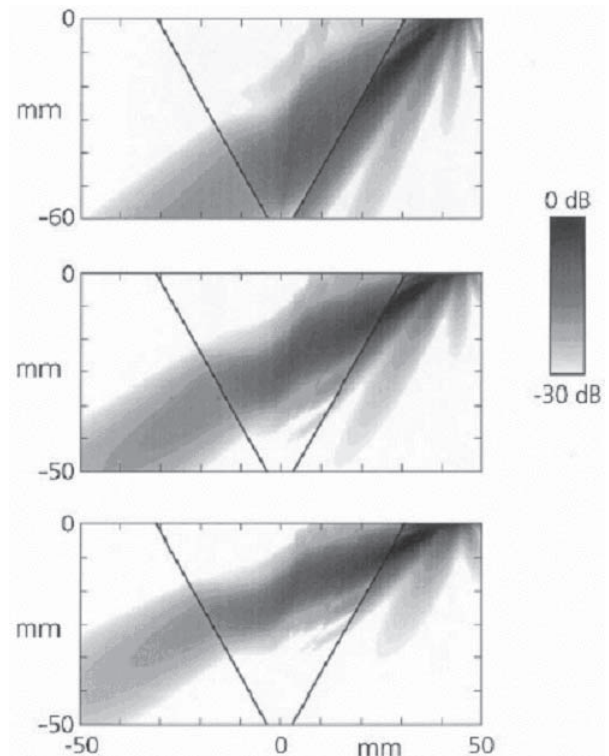
Tarkastuskohteena olevan komponentin ja materiaalin tiedot kuvataan mallinnusta varten yksityiskohtaisesti. Esimerkiksi austeniittinen hitsi voidaan jakaa useisiin vyöhykkeisiin ja jokaisessa vyöhykkeessä määritellä kiteiden suuntautuneisuus kuvassa 41 esitettyyn tapaan.

Mallinnuksen tuloksena saadaan äänikeilan muoto ja äänen eteneminen tarkastettavassa kohteessa. Lähdemateriaalissa esitetyissä tuloksissa äänikeilat on esitetty graafisina simulaatiokuvina, jotka ilmaisevat suuntautumisen ja äänenpaineen jakautumisen (kuva 42).

Fysikaalinen perusta

Mallit perustuvat kahteen analyyttiseen lähestymistapaan:

GPSS (Generalised Point Source Synthesis). Tämä malli perustuu Huygensin periaatteelle, jonka mukaan jokainen aaltorintaman piste toi-



Kuva 42. Pitkittäisaaltojen, jotka on synnytetty 45°:n, 60°:n ja 70°:n luotainkulmilla, eteneminen V-railohitsissä mallinnettuna GB-menetelmällä. Anturin etäisyys hitsin reunasta on 10 mm (Spies 2000 a).

mii lähtöpisteenä uudelle alkeisaallolle. Laske-
malla yhteen kaikkien alkeisaaltojen osuudet saa-
daan aallon amplitudi tietyssä pisteessä (Sandlin
1997).

GB (Gaussian beam). Anturissa syntyvä ultra-
äänisignaali ja siitä muodostuva ultraäänikeila
kuvataan Gaussin funktion avulla.

Sovellusalue

Mallit soveltuvat ultraääniluotaimien synnyttä-
män äänikeilan muodon selvittämiseen ja sen
muotoutumiseen erilaisissa tarkastuskohteissa.
Mallien avulla voidaan tarkastella äänen etene-
mistä ja taipumista anisotrooppisissa materiaa-
leissa kuten austeniittisessä hitsissä.

Status

Käytössä olleen kirjallisuusaineiston perusteella
syntyy kuva, että malleja on kehitetty tukemaan
omaa tutkimus- ja kehitystyötä. Niitä on sovellet-
tu esimerkiksi komposiittimateriaalien ja auste-
niittisten hitsien yhteydessä syntyvään tarkastus-
problematiikkaan ja vaiheistettujen antureiden
suunnittelutyöhön. Tähtäimessä ei niinkään näy-
tä olleen työkalu, joka simuloisi ultraäänitarkas-
tusta ja tuottaisi samantapaisia indikaatiokuvioi-
ta kuin todellinen tarkastus, ja jota voitaisiin
käyttää apuna tulosten analysoinnissa.

Tällä hetkellä ohjelmia ollaan kuitenkin kehit-
tämässä suuntaan, jossa käytännön tarkastuksis-
sa ilmenevät tarpeet voidaan huomioida parem-
min. Esimerkiksi vioista saatavien A-, B- ja C-
kuvien tuottaminen on mahdollista ohjelman
avulla.

Toteutus

Mallit on kehitetty toimimaan PC-ympäristössä
ja ne toimivat kolmiulotteisina. Windows-käyttö-
järjestelmään perustuva ohjelmisto CADMUS si-
sältää ainakin GPSS-menetelmään perustuvan
mallin ikkunoidussa käyttöympäristössä. Ohjel-
miston tehokkuutta voidaan parantaa siten, että
laitteistoon asennetaan erillinen prosessorikortti,
joka suorittaa mallinnuksen algoritmien lasken-
nan lyhentäen kokonaislaskenta-aikaa (Spies et
al. 1999).

Laskenta-ajat ovat kohtuullisia GB-mallin ol-
lessa nopeampi verrattuna GPSS-mallinnukseen.
Esimerkkeinä mainitaan, että GPSS-menetelmä-
llä aaltosimulaation laskeminen saadaan toteutet-

tua minuuteissa (Spies 2000 b). Vastaavasti ku-
vassa 42 esitetyt tulokset on laskettu GB-mallin
avulla muutamissa sekunneissa käyttäen 300
MHz:n Pentium PC:tä (Spies 2000 a).

Mallit ovat toistaiseksi IZFP:n omassa käytös-
sä. Mallinnustehtäviä suoritetaan tilauksesta ul-
kopuolisille.

Toimenpiteet mallin pätevöimiseksi

Mallinnustuloksia on verrattu kokeellisesti saa-
tuihin mittaustuloksiin. Tuloksia on esitetty aus-
teniittisten hitsien ja kerroksellisten kuitulujit-
teisten levyjen osalta (Spies 2000 a, Spies 2000 b)

3D-RaySAFT

Lähestymistapa

Tällä säteen jäljitysmenetelmään perustuvalla
mallilla voidaan seurata ultraäänien etenemistä
materiaalissa. Tarkastelu toimii sekä perusai-
neessa että anisotrooppisessa ja epähomogeeni-
sessa hitsiaineessa. Ohjelma mallintaa äänikei-
lan suunnan ja sen muuntumisen etenemisen ai-
kana. Keilan sisältämän äänenpaineen amplitu-
ditietoa ei sen sijaan lasketa.

Ohjelmaan kuuluu ikkunoitu käyttöliittymä ja
kokonaisuus vaikuttaa melko käytännölliseltä.
Mallinnus toimii kolmiulotteisessa ympäristössä
ja äänen etenemistä simuloivat kuvat ovat ha-
vainnollisia. Ohjelmaan on koottu valmiiksi nu-
meerisia arvoja (esimerkiksi eri materiaalien
elastisuusvakioita), joita voidaan suoraan käyttää
ohjelmassa simulointeja tehtäessä.

Lähtötiedot ja tulokset

Erilaisten valikkojen kautta voidaan antaa simu-
loinnissa käsiteltävän materiaalin tiedot. Ohjel-
ma sisältää CAD-toimintoja, joiden avulla tarkas-
tuskohde kyetään mallintamaan helposti. Erilli-
sen ikkunoidun valikon kautta määritellään hit-
sin muoto ja kiderakenteen suuntautuminen,
kuva 43. Erityyppisiä vikaheijastajia päästään
asettamaan mallinnetulle alueelle mielivaltaiseen
kohtaan.

Ohjelman laskemien mallinnusten tuloksena
saadaan erilaisia visuaalisia kuvauksia äänen
etenemisestä materiaalin sisällä (kuva 44).

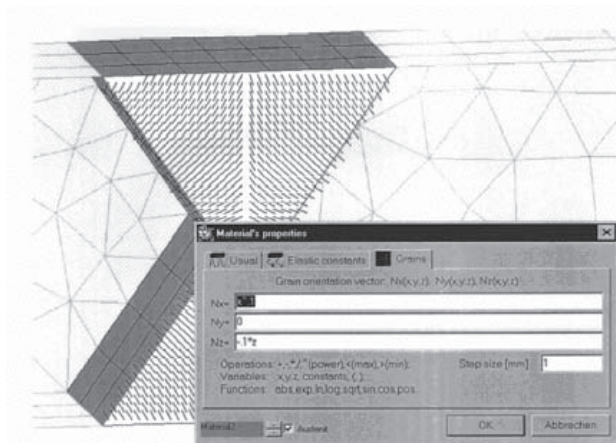
Ohjelmaan voidaan lisäksi syöttää todellista
mittausdataa, jota kyetään visualisoimaan kolmi-
ulotteisesti SAFT-algoritmia hyväksi käyttäen.

Fysikaalinen perusta

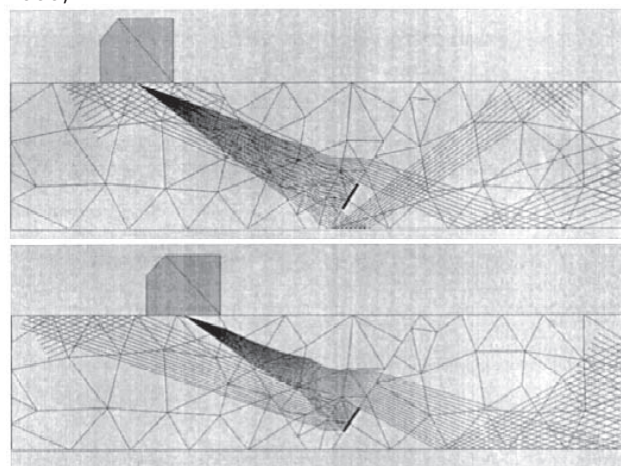
Mallinnus perustuu säteenjäljitys-algoritmiin (ray tracing), joka kykenee simuloimaan pitkittäisen, vaakasuoraan ja pystysuoraan polarisoidun poikittaisen aaltomuodon etenemistä. Materiaalin anisotropia voidaan huomioida algoritmissa ja se määritellään viiden elastisuusvakion ja tiheyden avulla.

Sovellusalue

Ohjelman avulla kyetään visualisoimaan ultraäänikeilan suuntautumista ja tarkastelemaan eri aaltomuotojen etenemistä. Sitä voidaan hyödyntää tarkastustekniikoiden optimoinnissa ja tulosten analysoinnin yhteydessä.



Kuva 43. Hitsin muotoilu ja kiderakenteen suuntautuneisuuden määrittäminen (Schmitz et al. 1999).



Kuva 44. Austeniittisen 60°:n railokulmalla toteutetun hitsin luotauksesta pitkittäisaaltoluotaimella (60°, qL-aaltomuoto). Yläkuvassa ääni heijastuu hitsin oikeaan reunaan sijoitetusta viasta takaisin anturiin. Alakuvassa anturi on liikkunut hieman eteenpäin (5 mm) eikä heijastunut ääniosuus enää osu anturiin (Schmitz et al. 1999).

Status

Tämän hetkinen ohjelmistovaihe on valmis. Jatkokehityshankkeista ei ole tarkempaa tietoa.

Toteutus

Ohjelmisto toimii PC/Windows-ympäristössä. Ikunoitujen toimintojen kautta voidaan erilaiset määitykset tehdä helposti ja nopeasti. Ohjelman laskentarutiini on nopea ja sitä voidaan käyttää vuorovaikutteisesti. Simulointi tapahtuu kolmiulotteisessa ympäristössä.

Ohjelma on ostettavissa kaupallisesti nimellä "3D-RaySAFT".

Toimenpiteet mallin pätevöimiseksi

Artikkelissa Schmitz et al. (1999) on esitetty yksi vertailu simuloitun ja mitatun tuloksen kesken. Tässä tapauksessa kohteena oli yksinkertainen, poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen, austeniittinen hitsi, jossa palkkerrokset olivat hitsin pinnan suuntaisia.

4.1.6 AEA Technology / Serco Assurance, Englanti

AEA Technology on ollut 1990-luvulla varsin voimakkaasti esillä erilaisten mallinnus- ja simulointiohjelmien kehittäjänä kuten raportista Sandlin (1997) ilmenee. Yritysjärjestelyjen seurauksena se osa AEA Technology:sta, joka omistaa oikeudet kehitettyihin ohjelmistoihin kuuluu nykyisin Serco-ryhmittymään ja on nimeltään Serco Assurance. Viime aikoina ohjelmistoista ei ole juurikaan raportoitu julkaistuissa artikkeleissa, mikä viittaa vähäiseen aktiivisuuteen kehitystyössä. Ilmeisesti tapahtuneet merkittävät organisaatiomuutokset ovat johtaneet toiminnan suuntaamiseen uudelleen. Kehitetyistä ohjelmistoista ainakin MUSE ja RAYTRAIM-nimiset ohjelmat ovat edelleen jäljellä ja Serco Assurance omistaa oikeudet kehittää ja myydä niitä. Alla olevat lyhyet tiedot kuvaavat lähinnä tämän hetkistä tilannetta ohjelmien osalta ja perustuvat pääasiassa sähköpostitse saatuihin vastauksiin kyselyyn, joka koski tilannetta AEA Technology:n mallien osalta (Atkinson 2001, Daniels 2001).

Lähestymistapa

MUSE-ohjelmistoa voidaan käyttää työkaluna tarkastusten suunnittelussa ja tarkastustulosten esittämiseen geometrialtaan monimutkaisten kohteiden osalta.

RAYTRAIM-ohjelmisto on suunniteltu tarkastusten mallintamiseen epähomogeenisissa ja anisotrooppisissa materiaaleissa.

Lähtötiedot ja tulokset

MUSE-ohjelmistossa määritellään tarkastuskohteen geometrinen muoto ja valitaan ohjelmiston sisältämästä valikoimasta viat, joita pyritään löytämään. Kun anturista lähtevä säde osuu mallinnuksessa vikaan, lasketaan palaavan säteen ominaisuudet ja saadaan ennuste vian havaittavuudesta.

RAYTRAIM-ohjelmistoa käytettäessä materiaalin (austeniittisen hitsin) ominaisuudet ja luotaustapa tulee kuvata ohjelmalle. Tulokseksi saadaan ennuste äänen etenemisestä ja taipumisesta sen kulkiessa hitsin läpi.

Fysikaalinen perusta

Molemmat ohjelmistot perustuvat säteen jäljitysmenetelmään (ray tracing).

Sovellusalue

MUSE-ohjelmisto on tarkoitettu käytettäväksi homogeenisille ja isotrooppisille materiaaleille. Kuvauksista päätellen se on melko suoraviivainen käytännön tarkastuksien suunnittelussa ja tulosten tarkastelussa sovellettava työkalu.

RAYTRAIM-ohjelmisto on taas puolestaan suunniteltu lähinnä austeniittisten hitsien luotauksessa syntyvien ongelmatilanteiden mallintamiseen.

Status

Ohjelmistojen kehitys on viime aikoina ollut vähäistä, koska AEA Tecnology:ssa kehitystyöstä vastanneet ryhmät ovat hajonneet. Serco Assurance kertoo kuitenkin itse käyttävänsä näitä ohjelmistoja sekä myyneensä ja myyvänsä edelleen niitä myös ulkopuolisille.

Toteutus

Ohjelmistot toimivat PC-ympäristössä.

Toimenpiteet mallin päteväimiseksi

MUSE-ohjelmiston osalta mainitaan että sitä on käytetty pohjana kehitettäessä tarkastusjärjestelmää höyrystimen yhteen tarkastusta varten. Tässä yhteydessä ohjelmisto on läpikäynyt EPRI:n päteväintimenettelyn. Tarkempaa tietoa päteväin-

nin toteutuksesta ja sisällöstä ei kuitenkaan ole käytettävissä.

4.1.7 Tecnatom SA, Espanja

Tecnatom SA:n säteen jäljitys -periaatteeseen perustuva ohjelmisto ”Midas Ray Tracing” edustaa tässä yhteydessä ”kevyitä” sovellutuksia, joita on monilla tahoilla tehty käytännön tarkastustyön suunnittelun ja simuloinnin apuvälineiksi. Ohjelmiston ominaisuuksia on tarkemmin käsitelty julkaisussa Sarkimo & Pitkänen (2000).

Lähestymistapa

Ohjelma on tehty käytännön työkaluksi, jonka käyttökelpoisinta aluetta on luotausten suunnittelu. Ultraäänen fysikaalista käyttäytymistä mallinnetaan vain huomioiden taittumis- ja heijastumissäännöt, joten varsinaisesti tieteellisiä tavoitteita ei ohjelmistolle ole asetettu.

Lähtötiedot ja tulokset

Tarkastuskohteen geometriasta muodostetaan kolmiulotteinen malli. Yksinkertaiset kohteet kuten suorakulmaiset, pyörähdysymmetriset tai tasokuvioista ”venyttämällä” saatavat kappaleet voidaan mallintaa itse simulointiohjelmassa. Monimutkaisemmat kappaleet voidaan mallintaa CAD-ohjelmistoilla ja siirtää sen jälkeen helposti simulointiohjelmaan.

Ohjelman valikkojen kautta kyetään simuloinnissa käytettävän luotauksen suoritustapaa ja anturin perusominaisuuksia määrittelemään monilla tavoin. Luotauksen simulointi voidaan toteuttaa joko operaattorin ohjauksessa ”käsiluotauksena” tai ”mekanisoituna” luotauksena virtuaalisen skannerin avulla.

Luotaustilannetta voidaan tarkastella koko ajan vuorovaikutteisesti reaaliajassa. Eri suunnista saatavien projektoiden ja kolmiulotteisen näkymän kautta luotaustilanne havainnollistuu hyvin. Keilan suuntautuminen luotauksen eri vaiheissa voidaan piirtää näkyviin säteillä ja dokumentoida siten sen onnistuminen tai epäonnistuminen. Luotaustilanteeseen liittyvät eri kulmien arvot ja äänitien pituudet ovat nähtävissä myös tarkkoina lukuarvoina. Lisäksi ohjelmiston avulla kyetään muodostamaan A-, B- ja C-kuvia, jotka tosin ovat hyvin karkeita ja kaavamaisia. Esi-merkkejä erityyppisistä tulostuksista on esitetty muun muassa kuvissa 3, 6, 14 ja 20.

Fysikaalinen perusta

Äänen eteneminen tarkastuskohteessa mallinnetaan suoraviivaisesti etenevien säteiden avulla. Fysikaalisista lainalaisuuksista on huomioitu vain Snellin lakiin perustuvat heijastumis- ja taittumissäännöt.

Sovellusalue

Tarkastuskohteen materiaali oletetaan homogeeniseksi ja isotrooppiseksi. Äänen nopeudet samoin kuin vaimenemisen lineaarinen voimakkuus kohdemateriaalissa voidaan antaa ohjelman muuttujina.

Kohteen geometriseen malliin voidaan asettaa mielivaltaiseen kohtaan ja asentoon vikaheijastajia. Heijastajat voidaan muotoilla CAD-ohjelmistolla, joten monimutkaisiakin muotoja voidaan käyttää.

Anturin synnyttämä äänikeila mallinnetaan hyvin yksinkertaisesti säteen tai sädekimpun (kartiomainen tai lieriömäinen) avulla. Äänen painetta keilan eri osissa ei mallinneta. Mallista puuttuu myös aaltomuodon muutosten ja diffraktiokaikujen huomioiminen.

Status

Ohjelmistosta ollaan kehittämässä uutta versiota, joka pystyy käyttämään geometrinen mallina suoraan NURBS-esitystapaan (non-uniform rational B -spline) perustuvaa tiedostomuotoa. Nykyisellään geometrinen mallien pinnat tulee muuttaa kolmioiden avulla esitettäväksi pinnoiksi, jotta ne voidaan siirtää simulointiohjelmaan. Kolmioiden käyttäminen aiheuttaa virhettä, joka suoraan NURBS-geometriaa hyödynnettäessä voidaan välttää.

Toteutus

Ohjelmisto toimii PC /Windows-järjestelmässä ikkunoidussa ympäristössä. Simulointi tehdään aina kolmiulotteisessa avaruudessa ja tulosta voidaan koko ajan tarkastella kolmiulotteisen näytön avulla. Ohjelma toimii vuorovaikutteisesti ja tavallisen toimistokäyttöön tarkoitetun PC:n laskentateho riittää kohtalaisen hyvin normaaliin simulointien toteuttamiseen. Valikkopohjainen käyttöliittymä on suhteellisen havainnollinen, mutta eri toimintojen sujuvan käytön opettelu vaatii kuitenkin huomattavasti aikaa. Ohjelmistoa myydään kaupallisesti.

Toimenpiteet mallin pätevöimiseksi

Tecnatom SA on tarkistanut ohjelmistonsa toimintaa vertailemalla sen antamia tuloksia kaupallisilla matemaattisilla ohjelmistoilla saatuihin tuloksiin. Myös koekappaleilla tehtyjä luotauksia on vertailtu simulointiohjelmiston antamiin tuloksiin. Julkaistua materiaalia näiden vertailujen tuloksista on kuitenkin heikosti saatavissa.

4.1.8 Wave Process Simulation Systems Laboratory, Venäjä

Lähestymistapa

Ohjelma on tarkoitettu työkaluksi, jolla voidaan tutkia käytännön luotauksilanteita. Sen ytimenä on kuitenkin ultraäänien aaltoliikettä mallintava laskentasovellus, jolloin voidaan simuloida ultraäänien fysikaalista käyttäytymistä tarkastustilanteissa. Sovelluksen toteutus Dos-käyttöjärjestelmässä tekee siitä kömpelön ja asettaa merkittäviä rajoituksia, koska nykyisten pöytätietokoneiden suorituskykyä ja muistin määrää ei voida hyödyntää. Mallinnus on toteutettu kaksiulotteisena.

Ohjelmisto koostuu kolmesta osasta, joihin päästään erillisen hallintaohjelman (Program Manager) kautta. Valmisteluosan (Graphic Preprocessor) avulla määritellään ja kuvataan simulointitilanne ja siihen liittyvät ehdot sekä muodostetaan lopuksi laskentaa varten tiedosto, joka sisältää kaikki lähtöarvot. Laskentaosa (Invariant Mathematical Processor) tekee laskennan ja muodostaa tulostiedostot. Analysointiosan (Graphical Postprocessor) avulla tulostiedostoja voidaan tarkastella ja visualisoida.

Lähtötiedot ja tulokset

Lähtötietoina kuvataan piirtotyökalujen avulla tarkastuskohteen geometria ja sen mahdollisesti sisältämät viat. Kuvatun geometrian eri osille määritetään äänennopeus ja tiheys, joita on kootu valmiiksi kirjastoksi ohjelman yhteyteen. Näitä materiaaliparametreja havainnollistetaan geometrisen mallin erilaisilla värityksillä. Käytettävän luotaimen ominaisuudet määritetään muotoilemalla sen tuottama lähtöpulssi haluttuun kohtaan kappaleen pinnalle. Lähtöpulssin määrittämiseen kuuluu äänenpaineen jakautumisen kuvaaminen ajan ja paikan suhteen.

Ohjelman laskentaosa tuottaa tulokseksi joukon tiedostoja, joiden sisältämää tietoa voidaan tarkastella melko monipuolisesti ohjelman analysointiosaan sisällytetyillä työkaluilla. Ultraäänipulssin etenemistä materiaalissa voidaan havainnollistaa äänen paineen jakautumista kuvaavien pysäytyskuvien avulla. Esimerkkejä äänen paineen voimakkuuden hetkittäisestä vaihtelusta on esitetty kuvissa 27, 32 ja 35. Pysäytyskuvissa etenevä pulssi voidaan esittää myös vektorien tai vaiheinformaation avulla. Simuloinnin koko kestoajalta voidaan äänenpaine esittää integroidun kuvauksen avulla, josta päästään edelleen tulostamaan A-kuvia. A-kuvien muodostamiseen käytetty vastaanotinpinnan paikka ja koko on määritettävissä.

Fysikaalinen perusta

Ohjelmiston ytimenä oleva matemaattinen laskenta perustuu numeeriseen menetelmään. Finite difference -menetelmästä on kehitetty oma versio, joka soveltuu käytettäväksi vaatimattoman prosessoritehon ja pienen keskusmuistin omaavissa tietokoneissa (Alyoshin et al. 1995). Verrattuna nykyisten mikrotietokoneiden suorituskykyyn ohjelmiston laskenta vaatii erittäin vaatimattoman prosessoritehon. Koska numeeriset ratkaisut mallinnusohjelmistoissa vaativat yleensä eniten laskentatehoa, on optimointi nähtävästi toteutettu tehokkaasti. Toisaalta simuloitava alue, jota ohjelman pystyy käsittelemään on varsin vaatimaton ja sinänsä huomattava rajoitus ohjelman soveltamiselle.

Sovellusalue

Ohjelmistoa voidaan käyttää ultraäänitekniikan perusasioiden tarkasteluun ja havainnollistamiseen. Simuloitava alue voidaan koostaa useista erilaisista materiaaleista. Äänen käyttäytymistä eri materiaalien ja niiden välisten rajapintojen läpi voidaan tarkastella. Simuloinnissa käytettävissä olevien materiaalien ominaisuudet ovat homogeenisia. Koostamalla simulointialue erilaisista alueista, joille on määritelty toisistaan poikkeavat ominaisuudet, voidaan materiaaliominaisuuksien vaihtelua esimerkiksi kerrosrakenteiden osalta huomioida.

Käyttäjä kykenee mallintamaan sovelluksensa geometriaa muotoilemalla piirtotyökalujen avulla kohteen kaksiulotteisen kuvauksen. Dos-käyttö-

järjestelmä rajaa ohjelman käytettävissä olevan muistikapasiteetin pieneksi, jolloin simulointialue jää hyvin vaatimattomaksi. Esimerkiksi kulma- luotausta simuloitaessa materiaaliipaksuudet voivat olla vain noin 10 mm. Simulointien laskenta- ajat ovat lyhyitä, käytännössä yleensä 1...2 minuutin luokkaa.

Ohjelmisto simuloi heijastumiseen ja taittumi- seen liittyvät ilmiöt sekä särön kärjessä syntyvän diffraktiokaiun. Sen sijaan aaltomuodon muutok- sia ohjelma ei kykene huomioimaan.

Status

Käytettävissä oleva ohjelmistoversio on toteutet- tu teknologialla, joka on tällä hetkellä vanhentu- nutta. Ohjelmiston kehittämistä on nähtävästi jatkettu ainakin jossain määrin (Alyoshin et al. 1995). Ohjelmiston kehittäjä on ilmoittanut omaa- vansa valmiudet kolmiulotteisen simulointiohjel- man tuottamiseen Windows-käyttöjärjestelmään.

Toteutus

Simulointi nykyisellä ohjelmistoversiolla toteute- taan kaksiulotteisena. Ohjelmisto toimii Dos- käyttöjärjestelmässä ja laitteistovaatimukset ovat erittäin pienet. Vanhasta käyttöjärjestelmästä ai- heutuu kuitenkin huomattavia rajoituksia ja oh- jelmiston käyttöliittymä on suhteellisen kömpelö. Käyttöjärjestelmästä johtuen ohjelmiston tulokse- na saatava grafiikka on karkeaa ja sen siirtämi- nen nykyaikaisiin ohjelmiin työlästä.

Toimenpiteet mallin pätevöimiseksi

Mallin pätevöimiseen liittyvistä toimenpiteistä tai aineistosta ei ole saatu tietoa.

4.2 Yhteenveto ohjelmistojen nykytilanteesta

Ultraäänitarkastuksen simulointi- ja mallinnus- ohjelmistojen kehitystyön alueella on nykyisel- lään runsaasti aktiivisuutta. Näkyvimmin ovat esillä alan tutkimuslaitokset, jotka ovat kyenneet kohdistamaan aiheeseen tutkimustyötä usean vuoden ajan. Mallinnusohjelmien luominen ja ke- hittäminen on pitkäjänteistä työtä. Yksistään nii- den ajan tasalla pitäminenkin vaatii nykyisen no- pean laitteistokehityksen takia jatkuvaa panos- tusta. Varsinaisten mallinnusohjelmistojen lisäk- si on olemassa eritasoisia ja erilaisiin tarkoituk- siin suunniteltuja ”työkaluja”, joita voidaan käyt-

tää apuna esimerkiksi tarkastusten suunnittelussa. Näiden kehittämisessä ovat olleet mukana myös useat kaupalliset yritykset. Näistä ”kevyemmistä” ohjelmistoista on tähän raporttiin otettu mukaan esimerkiksi vain Tecnatom SA:n ohjelmisto.

Kehittyneillä mallinnusohjelmistoilla saadaan nykyisellään tuloksia, joita voidaan verrata todellisissa tarkastuksissa saataviin tuloksiin esimerkiksi B- ja C-kuvien muodossa. Näiden avulla kyetään suunnittelemaan tarkastusten toteutusta ja arvioimaan etukäteen mahdollisesti syntyviä ongelmatilanteita. Austeniittiset hitsit, jotka ovat ultraäänitarkastuksen kannalta haastavia, ovat saaneet eri mallinnusryhmien osalta paljon huomiota. Mallien tavoitteena on ennustaa ultraäänien etenemisreitti ja keilassa tapahtuvat muut muutokset sen osuessa hitsin suuntautuneeseen kiderakenteeseen. Käytännössä tarkastuskohteen olevan hitsin kiderakenteen selvittäminen riittävällä tarkkuudella saattaa kuitenkin olla ongelma, joka voi vaikeuttaa huomattavasti mallien

hyödynnettävyyttä tähän tarkoitukseen.

Huolimatta mallinnusohjelmistoihin suunnattusta huomattavasta panostuksesta valmiita kaupallisia tuotteita ei markkinoille ole juurikaan tullut tai niitä ei ainakaan markkinoida aktiivisesti. Monet ohjelmistoista ovat kuitenkin ostettavissa, mutta hinnat ovat suhteellisen korkeita. Osa ohjelmistoista on toisaalta vain kehittäjien omassa käytössä ja mallinnusta tehdään ulkopuolisille tilaustyönä.

Käytännössä kaikki käsitellyt mallinnusohjelmistot toimivat tällä hetkellä PC-ympäristössä. Tietokoneiden laskentatehon kasvaessa edelleen voidaan uskoa, että vaativimmatkin mallit saadaan toimimaan riittävän nopeasti, jotta vuorovaikutteinen työskentely on mahdollista. Tällä hetkellä mallinnus toteutetaan jo useimmilla ohjelmilla kolmiulotteisesti tai siihen ollaan ainakin pyrkimässä. Toisaalta kolmiulotteisuus on tärkeä piirre, jotta kyetään käsittelemään käytännössä esiintyviä, todellisia tarkastustilanteita.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä raportissa on tarkasteltu kahden ultraäänitarkastuksen simulointiin soveltuvan ohjelmiston ominaisuuksia ja havainnollistettu esimerkkien avulla niiden toimintaa sekä käyttömahdollisuuksia. Lisäksi on esitetty katsaus ultraäänitarkastuksen mallinnukseen ja simulointiin suunniteltujen ohjelmistojen nykytilaan. Tässä katsauksessa on huomioitu keskeiset eurooppalaiset ultraäänisimuloinnin ja -mallinnuksen kehittäjät. Katsauksessa on käytetty lähtökohtana ENIQ:n suositukseen (ENIQ 1999) sisältyvää asialistaa.

Sädemenetelmä tarjoaa ultraäänitarkastuksen simulointiin hyvin havainnollisen ja käytännöllisen lähestymistavan. Sen avulla voidaan nopeasti suunnitella ja tarkistaa luotauksen geometrian kannalta keskeiset seikat. Optimaalisten luotauskulmien selvittäminen vaikeasti hahmotettavien geometrysten muotojen osalta saattaa olla hyvin hankalaa ja työlästä. Tällaisessa tilanteessa kolmiulotteisten mallien käyttö ja sädemenetelmän soveltaminen niihin on hyvin havainnollinen ja nopea tapa etsiä ratkaisuja.

Tarkastelussa mukana ollut sädemenetelmä huomioi kaavamaisesti ultraäänen heijastumiseen ja taittumiseen liittyvät säännöt. Sen sijaan lähes kaikki muut fysikaaliset tekijät jäävät simuloinnin ulkopuolelle. Näitä piirteitä voidaan jossain määrin tutkia toisella raportissa käsitellyllä ohjelmistolla. Tämän ohjelmiston avulla voidaan havainnollistaa ultraäänen aaltoliike materiaalisissa ja äänenpaineen jakautuminen materiaalin sisällä eri ajanhetkinä. Ultraäänilähteen ominaisuuksia voidaan mallintaa monipuolisesti ja siten synnyttää halutun muotoinen äänikeila. Lisäksi voidaan havainnollistaa esimerkiksi kärkeiköiden syntyminen. Ohjelmiston käyttömahdollisuuksia heikentää sen vanhahtava toteutus,

mistä aiheutuu huomattavia rajoituksia simuloitavan kohteen koon suhteen. Lisäksi nykyinen käytössä ollut versio on toteutettu vain kaksiulotteisena.

Raporttiin sisältyvä katsaus mallinnus- ja simulointiohjelmistojen nykytilanteeseen osoittaa, että mielenkiintoa tätä aluetta kohtaan on olemassa runsaasti ja useita kehityshankkeita on käynnissä. Simulointiin tarkoitetut ohjelmistot voidaan jakaa pääosin kahteen ryhmään. Osa ohjelmistoista on tarkoitettu ultraääniluotauksen geometrian tarkasteluun ja toinen osa suunniteltu huomioimaan laajemmin fysikaaliset lainalaisuudet.

Geometrisiin tarkasteluihin perustuvat ohjelmistot ovat insinöörimäisiä työkaluja joiden avulla kyetään nopeasti ja melko kaavamaisesti selvittämään käytännön tarkastuksiin liittyviä kysymyksiä. Näiden ohjelmistojen toteutus on periaatteiltaan yksikertaista ja sen vuoksi niitä on käsitelty vähän tieteellisissä artikkeleissa. Tässä raportissa käsitelty sädemenetelmään perustuva simulointi on tyypillinen tähän ryhmään kuuluva sovellus.

Ohjelmistot, jotka huomioivat laajasti ultraäänen fysikaaliset ominaisuudet, ovat usein lähestymistavaltaan tieteellisiä. Niiden taustalla on runsaasti teoreettista ja matemaattista työtä, jota on esitetty laajasti tieteellisissä artikkeleissa. Ohjelmistojen käyttö edellyttää yleensä syvällistä perehtymistä niiden toimintaan. Niiden soveltamisen käytännön ongelmiin saattaa sen vuoksi olla hidasta ja työlästä. Toisaalta näiden ohjelmistojen avulla on mahdollista saada arvokkaita ja todenmukaisia tuloksia, joissa on kyetty huomioimaan kaikki tärkeät lopputulokseen vaikuttavat tekijät.

Lähdeviitteet

- Alyoshin N, Kniazev V, Zemlyanski A. 1995. Computer-aided design of ultrasonic nondestructive methods and techniques. Teoksessa: Computer methods and inverse problems in nondestructive testing and diagnostics. Minsk, Belarus, November 21–24, 1995. S. 238–243.
- Atkinson I. 2001. Sähköpostitse Serco Assurance:lta saatu vastaus kyselyyn, joka koski AEA Technology:n kehittämien mallien tilannetta.
- Boström A. 2000. User guide to UTDefect, Version 3: A computer program modelling ultrasonic Non-destructive testing of a defect in an isotropic component.
- Calmon P, Lhémy A, Lecoeur-Taibi I., Raillon R. 2000. Recent developments in ultrasonic NDT modelling in CIVA. 15th World conference on NDT, 15-21.10.2000, Rome.
- Daniels W. 2001. Sähköpostitse Serco Assurance:lta saatu vastaus kyselyyn, joka koski AEA Technology:n kehittämien mallien tilannetta.
- ENIQ. 1999. Recommended Practice 6: The use of modelling in inspection qualification. ENIQ Report nr. 15. European Commission, DG – Joint Research Centre, Petten, NL. EUR 19017 EN. 11 s.
- Eriksson AS, Mattsson J, Niklasson AJ. 2000. Modelling of ultrasonic crack detection in anisotropic materials. NDT & E International, Volume 33, Issue 7, (October 2000). ss. 441–451
- Langenberg KJ, Hannemann R, Kaczorowski T, Marklein R, Koehler B, Schurig C, Walte F. 2000. Application of modeling techniques for ultrasonic austenitic weld inspection, NDT & E International, Volume 33, Issue 7, (October 2000). ss. 465–480
- Lecoeur-Taibi I, Le Ber L, Calmon P, Abittan E. 2001. Contribution of modelling to the technical qualification of UT methods. The 3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Seville, Spain.14–16.11. 2001.
- Lhémy A, Calmon P, Lecoeur-Taibi I, Raillon R, Paradis L. 2000. Modeling tools for ultrasonic inspection of welds, NDT & E International, Volume 33, Issue 7, (October 2000). ss. 499–513.
- Poidevin C, Roy O, Chatillon S. 2001. Simulation tools for ultrasonic testing inspection of welds. The 3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Seville, Spain.14–16.11. 2001.
- Sandlin S. 1997. Simuloinnin hyödyntäminen ultraäänitestauksen kehittämisessä. Säteilyturvakeskus. STUK-YTO-TR-140. 39 s.
- Sarkimo M, Särkiniemi P, Jeskanen H, Hirn M. 1999. Koesarja kipinätyöstetyillä ultraääniheijastajilla. Valmistus ja ultraäänivasteet. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VALB-429. 24 s. + liitt. 7 s.
- Sarkimo M., Pitkänen J. 2000. Ultraääniluotauksen simulointi sädemenetelmällä. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. BVAL-65-001084. 25 s. + liite 6 s.
- Sarkimo M. 2001. Ultraääniluotauksen simulointi yhteen sisäpyörityksen alueella. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. BVAL65-011185. 18 s.
- Schmitz V, Walte F, Chakhlov SV. 1999. 3D ray tracing in austenite materials. NDT & E International, Volume 32, Issue 4, (June 1999). ss. 201–213.

- Spies M. 2000 a. Modelling of transducer fields in inhomogeneous anisotropic materials using Gaussian beam superposition. NDT & E International, Volume 33, Issue 7, (April 2000). ss. 155–162.
- Spies M. 2000 b. Analytical methods for simulation of ultrasonic testing of complex media on personal computer. MP Materials Evaluation, Vol. 58, nr. 7. ss. 897–901.
- Spies M. 2000 c. Ultraschallprüfung komplexer Werkstoffe und Bauteile simulieren. MP Materialprüfung, Vol. 42, nr. 11–12. ss. 445–449.
- Spies M, Rieder, H., Wüstner, H. 1999. Ultraschallprüfung PC-basiert simulieren. MP Materialprüfung, Vol. 41, nr 1–2. ss. 8–11.
- Wirdelius H. 2000. User guide to SUNDT – A simulation tool for ultrasonic NDT. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI). SKI Report 00:29. 31 s.
- Wüstenberg H, Erhard A, Tschardtke D. 2000. Ultraschallprüfung an Schweissnähten. Bewertung kritischer Befunde mit Modellrechnungen. MP Materialprüfung, Vol. 42, nr 11–12. ss. 433–436.
- Wüstenberg H, Erhard A. 1997. Approximative modelling for the practical application at ultrasonic inspections. NDTnet, May 1997, Vol. 2, no 5. Verkkojulkaisu osoitteessa:
<http://www.ndt.net/article/wsho0597/wuesten2/wuesten2.htm>